

*Master 2 Professionnel
Télédétection et Géomatique Appliquées à l'Environnement*

Université Denis Diderot Paris 7



Rapport de stage de fin d'étude

Analyse du potentiel des capteurs RADAR en bandes L,
C et X pour la caractérisation des états de surface
agricole : Application à la culture de la canne à sucre de
La Réunion



Travail réalisé par : Nathalie Boyer

Et encadré par : Nicolas Baghdadi (CEMAGREF, UMR TETIS, Montpellier)
Pierre Todoroff (CIRAD-Réunion, Saint Pierre)

Année universitaire : 2007-2008

Remerciement :

Durant ces six mois de stage, j'ai pu acquérir des connaissances dans le domaine de la télédétection dans lequel je souhaite poursuivre professionnellement, mais aussi dans le domaine agricole dont je n'étais pas familière avant le début de ce stage.

Tout d'abord, je remercie mes encadrants : Nicolas Baghdadi, pour tous son appui et ses bons conseils sur le traitement des images RADAR, ainsi que Pierre Todoroff qui m'a introduit dans le milieu agricole cannier et m'a fait découvrir la culture de la canne à sucre à l'île de La Réunion. De même, je souhaite remercier Agnès Bégué et Mahmoud Elaji, pour leur soutien et conseils qui ont pu m'aider dans le déroulement de mon stage.

Je remercie également l'équipe de la Maison de la Télédétection de Montpellier ainsi que le personnel du CIRAD à La Réunion pour leur bon accueil. Aussi, Louis Paulin qui m'a accompagné sur les parcelles d'étude et m'a appris de multiples connaissances sur les pratiques agricoles. Sans oublier, l'exploitant Bertrand Caruel qui nous permet d'étudier en détail ses parcelles de canne à sucre et d'avoir accès à ces dernières.

Table des matières

Résumé, abstract.....	4
Introduction.....	5
I- Matériels et méthodes utilisés.....	6
I-1 Contexte agronomique et site d'étude.....	6
I-1-1 Culture de la canne à sucre, cycles.....	6
I-1-2 Milieu naturel.....	9
I-1-3 Parcelles de référence.....	9
I-2 Sources des données de télédétection.....	10
I-2-1 Données RADAR.....	10
I-2-1-1 Principe.....	10
I-2-1-2 Capteurs RADAR.....	11
I-2-1-3 Prétraitement des données RADAR.....	12
I-2-2 Données optiques.....	14
I-3 Méthodologie pour l'analyse.....	15
I-3-1 Paramètres étudiés.....	15
I-3-2 Données complémentaires et données simulées de croissance du modèle MOSICAS.....	17
I-3-3 Relation entre mesures RADAR, optique et variables culturelles.....	20
I-3-4 Suivi temporel du coefficient de rétrodiffusion : méthode de normalisation angulaire.....	23
II- Résultats et discussion.....	24
II-1 Relation entre le coefficient de rétrodiffusion et les états culturaux.....	24
II-1-1 Influence de la polarisation.....	25
II-1-2 Influence de l'angle d'incidence.....	26
II-2 Sensibilité du coefficient de rétrodiffusion à la hauteur de la canne (mesurée sur le terrain).....	29
II-3 Relation entre coefficient de rétrodiffusion et indice de végétation NDVI.....	31
II-4 Relation entre le coefficient de rétrodiffusion et la teneur en eau dans la canne.....	33
II-5 Suivi temporel coefficient de rétrodiffusion.....	33
Synthèse et conclusion.....	36
Références bibliographiques.....	37
Figures.....	38
Tableaux.....	39
Annexes.....	40

Résumé :

Les images satellitaires permettent d'étudier les pratiques agricoles de cultures diverses. Le CIRAD et SPOT Image ont mis en place entre 2003 et 2005 un outil d'aide à la gestion de la culture de la canne à sucre avec un SIG et les images optiques (projet SUCRETTE).

L'objectif de ce stage est de prolonger ces travaux et d'évaluer le potentiel des images RADAR à caractériser les états cultureux des parcelles de cannes à sucre (canne coupée, sol nu, canne à différents stades de croissance), afin d'enrichir et de compléter les informations déjà obtenues avec les images optiques. Pour cela, nous avons regardé plus précisément l'influence sur le signal RADAR des paramètres suivant : angle d'incidence, polarisation et longueur d'onde grâce à l'analyse d'images RADAR acquises par les trois capteurs hyperfréquence : TERRASAR-X (bande X), ALOS/PALSAR (bande L), et ASAR/ENVISAT (bande C).

Nous nous sommes intéressés aux valeurs de coefficient de rétrodiffusion (σ_{dB}^o) des parcelles de canne à sucre de référence à différentes dates et suivi dans un second temps l'évolution dans le temps de σ_{dB}^o . Nous avons observé sous plusieurs approches la sensibilité du signal RADAR aux différents stades de développement de la canne à sucre. Les résultats confirment bien le fort potentiel de caractérisation de ces stades. Cependant, ce potentiel est limité dans les cas des sols labourés et les cannes à sucre matures en état de stress hydrique (dessèchement de la canne provoqué par un manque d'eau) qui peuvent être confondues avec d'autres stades de croissance.

Abstract:

Remote sensing images allow the monitoring of field techniques among crops. CIRAD and SPOT imaging set up between 2003 and 2005 a powerful tool to help the management of sugar cane crops within the framework of GIS and optical images (SUCRETTE project).

The purpose of this training period is to study the potentiality of the RADAR images to characterise the cultural stage of sugar cane crops (harvested, ploughed soil, phenological stage), in order to increment and to fulfil information already acquired by optical images. That said, we focused on the influence on three different parameters affecting the RADAR signal: incident angle, polarisation and wave length, thanks to RADAR images acquired by three sensors: TERRASAR-X (X band), ALOS/PALSAR (L band), ASAR/ENVISAT (C band).

First, we studied backscatter coefficient values (σ_{dB}^o) of sugar cane reference field at different dates and secondly, analyze the temporal evolution of σ_{dB}^o . We observed on several points the RADAR signal sensibility at different growing stage of sugar cane, validating a characterization potential. Nonetheless, this potential remain limited for ploughed soil and mature sugar cane under hydric stress (drying of sugar cane causing by a water deficiency) which could be confused with other growing stage.

Introduction

La télédétection est un outil largement utilisé de nos jours dans le domaine agricole car elle permet de couvrir des zones étendues (plusieurs centaines de kilomètres carrés) et d'assurer un suivi temporel de paramètres biophysiques des parcelles cultivées (indice de végétation, état de surface...). C'est ainsi que le CIRAD et SPOT Image ont mis en place le projet SUCRETTE (SUivi de la Canne à sucRE par TélédéTEction) afin d'aider la filière canne de l'île de La Réunion à la gestion de sa production.

Etant cultivée sur la moitié des exploitations agricoles de l'île, soit 4800 sites, la canne à sucre est une culture très développée dans l'île (Courteau, 2005). Elle joue un rôle conséquent dans l'économie de La Réunion (chiffre d'affaire à l'exportation en 2004 : 110 millions d'euros) (Bégué et al, 2005). La production finale résulte d'un processus continu d'élaboration de biomasse végétale et d'une bonne organisation de la récolte. Il est donc important d'avoir un suivi continu des cultures afin d'aider à organiser les récoltes et les interventions culturales qui rythment le cycle de la canne.

C'est ainsi qu'entre 2002 et 2004, des outils et produits thématiques issus de l'imagerie satellitaire optique et d'algorithmes de traitement des données ont été développés dans le cadre du projet SUCRETTE afin d'identifier les états de culture (coupe, labours) à l'échelle parcellaire, de diagnostiquer l'hétérogénéité intra et inter parcellaire, de prévoir le rendement, et de suivre l'avancement de la récolte de plusieurs sites d'étude dont l'exploitation de Bertrand Caruel. Les résultats obtenus ont répondu en grande partie à la demande des différents acteurs de la filière cannière. Les produits de SUCRETTE constituent alors de précieux outils d'aide à la gestion de productivité et sont en cours de mise à disposition de la filière. Cependant, un des problèmes majeurs avec les images optiques reste leur incapacité à traverser le couvert nuageux et par conséquent à imager les zones d'étude. De ce fait, la continuité du suivi parcellaire ne peut pas toujours être assurée.

Bien que les images RADAR (mode actif), soient plus complexes à analyser que les images optiques, elles apportent toutefois une toute autre information renseignant d'avantage sur la géométrie (taille, rugosité de surface) de la cible ainsi que sur la teneur en eau de celle-ci. Mais les capteurs RADAR ont surtout l'avantage de pouvoir observer une région d'étude quelle que soit la météo. Les images RADAR peuvent donc être une bonne solution pour le suivi continu des cultures.

Dans l'étude des cultures agricoles, il est très fréquent de combiner les images optiques et les images RADAR, afin de réunir deux types d'informations à la fois : réponses spectrale (optique) et structurale (RADAR) de surface de la culture. Ainsi, divers traitements ont été élaborés pour améliorer la discrimination des cultures afin de garantir une bonne classification des différentes variétés (blé, betterave, pomme de terre, maïs...) (Kuplick et Freinkas, 2000). Par ailleurs, un algorithme de fusion de données (optiques et RADAR) permet d'approfondir cette méthode de classification (Hegar-Masclé et Le, 2000). Toutefois, les images RADAR peuvent aussi être utilisées individuellement pour établir une classification de cultures basée sur la différence de rugosité entre chacune (Schotten et Van Rooy, 1995), évaluer des risques d'érosion des sols nus à cause du ruissellement (Baghdadi et Berner, 2001), ou encore comme l'a montré l'étude de Choudhury et al (2006), de caractériser les phases de croissance de cultures de riz. C'est cette sensibilité du signal RADAR à la hauteur du couvert végétal, qui est mise en avant dans ce stage, et appliquée à la culture de la canne à sucre à l'île de La Réunion.

L'objectif du stage est donc d'analyser le potentiel de l'imagerie RADAR pour la caractérisation des états de parcelles de canne à sucre, et ce avec différents capteurs RADAR (TERRASAR-X, ALOS/PALSAR, ENVISAT/ASAR). Dans un second temps, il s'agit d'évaluer leur intérêt en complément des produits issus d'images optique déjà développés. Par conséquent, le travail est focalisé sur la compréhension du signal RADAR et la définition d'une configuration RADAR optimale de paramètres d'acquisition (longueur d'onde, angle d'incidence, polarisation) pour mieux identifier les parcelles coupées, labourées ou encore recouvertes par de la canne mature.

Ainsi, les données RADAR permettraient-elles de remplacer l'imagerie optique pour caractériser les états de parcelles de canne à sucre, et par conséquent d'aider à la gestion de production ? Ou est-ce la complémentarité des deux types de techniques qui apporte la meilleure solution dans cet objectif.

Ce rapport présente une première partie consacrée au cadre d'étude, au matériel et à la méthode d'analyse des données utilisés. La seconde partie présente et discute les résultats obtenus.

I- Matériels et méthodes utilisés

Nous avons choisi pour notre étude une exploitation de canne à sucre (propriétaire Bertrand Caruel) située au nord de l'île (latitude : entre 20°53' S et 20°56' S ; longitude : entre 55°34' E et 55°36' E). Les observations et les informations extraites des images optiques et RADAR, sont donc relatives à ces parcelles de référence.

I-1 Contexte agricole et site d'étude

I-1-1 Culture de la canne à sucre, cycles

La canne à sucre (*Saccharum Officinarum*) fait partie des « graminées ». Au stade mature, elle est constituée de plusieurs tiges regroupées en touffe, pouvant atteindre entre 4 et 5m de haut selon la variété cultivée. Introduite depuis le XVII^{ème} siècle à La Réunion, la canne à sucre constitue d'un point de vue historique mais aussi économique, la culture la plus importante de l'île de nos jours. Elle concerne directement 20 000 emplois sur l'île et assure les deux tiers des exportations en 2002 (Courteau, 2005).

Bien d'autres aspects caractérisent l'importance de cette culture dans l'île. Notamment dans l'aménagement du territoire où la canne apporte une qualité du paysage et une attractivité touristique ; dans son rôle contre l'érosion de l'île, qui peut être importante à cause du relief et des cyclones répétés en saison chaude ; ou encore dans la production d'énergie favorisant alors une certaine autonomie des entreprises ou usines sucrières (Bégué et al, 2005).

Concernant son occupation sur l'île, elle représente 60% de la surface agricole utile (SAU), soit environ 26 000 hectares qui sont répartis sur de nombreuses petites exploitations

principalement situées sur le pourtour de l'île, jusqu'à une altitude de 800m. (Figure 1) (Courteau, 2005).

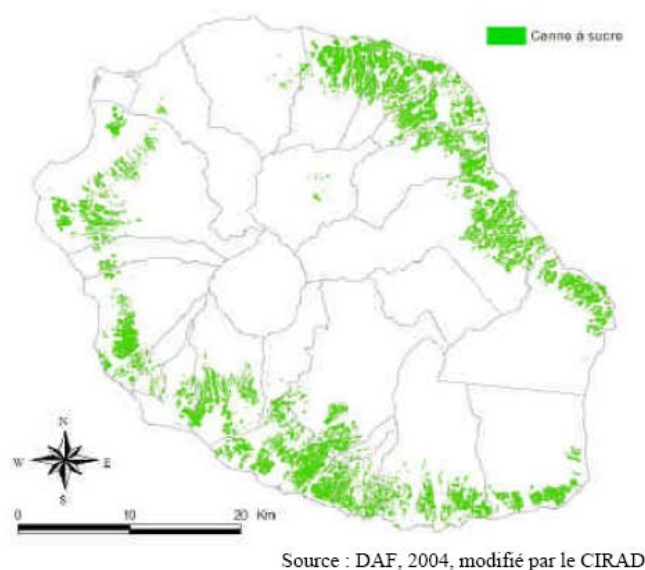


Figure 1: Répartition des champs de canne à sucre sur l'île de La Réunion en vert

La culture de la canne présente à la fois un cycle de croissance (12 à 14 mois) délimité par les récoltes et un cycle de repousses (5 à 7 cycles de croissance). On plante la canne une première fois par bouturage, ce qui marque le début de son cycle, puis chaque année à maturité, elle est coupée, ce qui correspond à la fin du premier cycle de croissance. A cette étape, les racines sont laissées en terre et la souche va émettre de nouvelles tiges. On estime qu'au bout de la cinquième voire septième repousse, le rendement est insuffisant. La parcelle est alors labourée et de nouvelles plantations sont mises en terre (Figure 2).

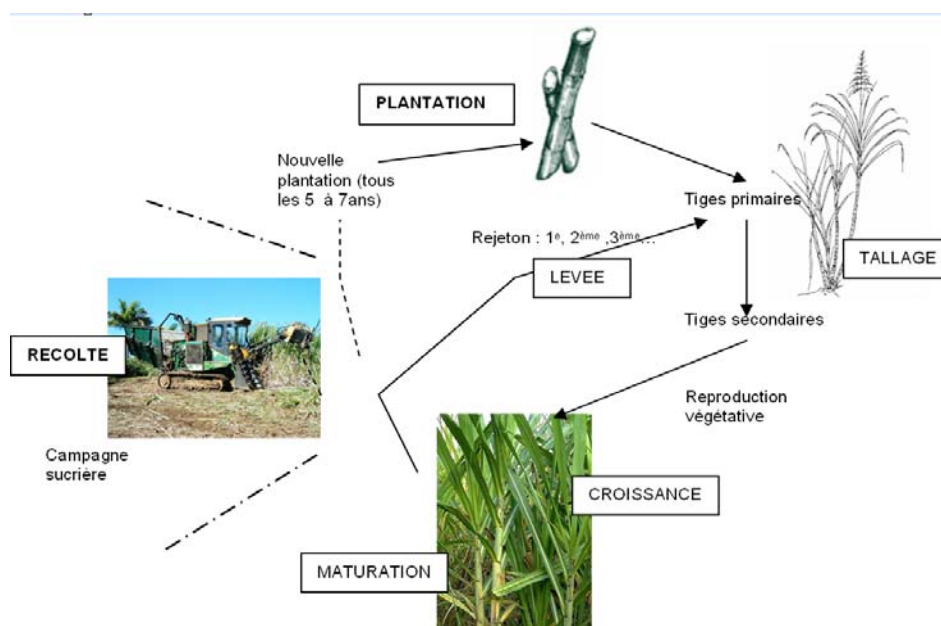


Figure 2 : Le cycle annuel et cycle floral

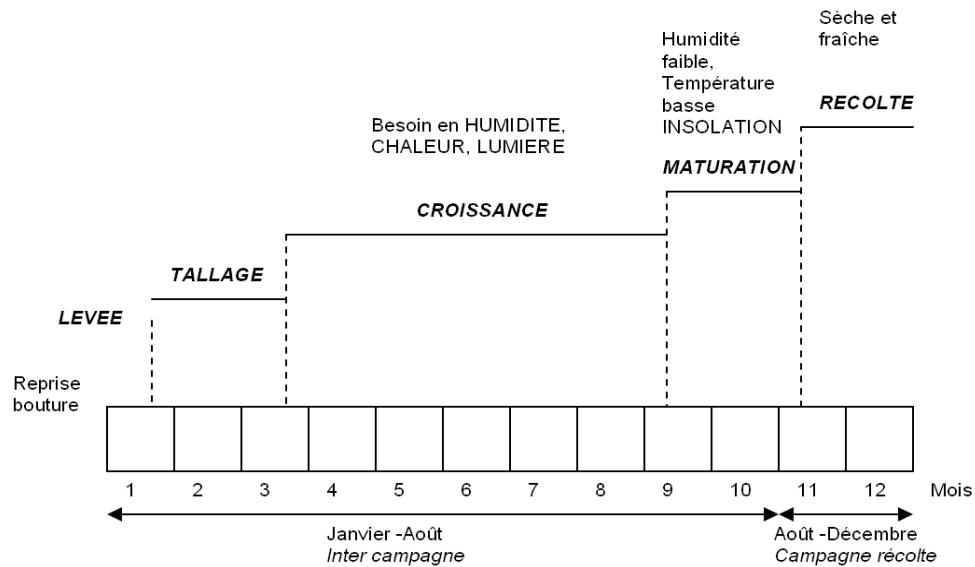


Figure 3 : Décomposition du cycle annuel. (Fauconnier, 1991)

Plusieurs phases de développement composent un cycle. Elles sont caractérisées par des états de croissance différents (Hoarau, 2004).

-La plantation : Des boutures portant des bourgeons (appelés aussi « yeux »), sont disposées à faible profondeur dans une terre humide (Figure 3).

-La levée les bourgeons puisent dans leurs réserves et l'eau du sol pour germer. Une jeune tige commence alors à pousser et est alimentée par des racines, issues de la zone racinaire (situé au-dessus d'un entre nœud) de la bouture.

-Le tallage : Cette phase correspond à une densification du couvert végétal, par formation successive de tiges. Tout d'abord, les bourgeons de racines vont former des tiges secondaires, puis à partir de ces dernières, des tiges tertiaires vont se former. Les conditions du milieu ainsi que le nombre de tiges vont déterminer la durée du tallage.

-La croissance : le bourgeon situé à l'extrémité des tiges primaires donne suite à une succession de nœuds et d'entre nœuds. Ainsi les tiges grandissent progressivement et le feuillage commence à se développer en parallèle. L'indice foliaire (LAI : Leaf Area index) augmente jusqu'à un palier de saturation d'environ LAI=5.

-La floraison : à un certain stade de la croissance, le bourgeon terminal se transforme en bourgeon floral. Ce dernier donne naissance par la suite à une inflorescence en deux ou trois mois (Figure 3).

-La maturation et surmaturation : elle ne se produit que sous l'influence du froid et du manque d'eau après le stade de floraison. Ces conditions réunies font accumuler le saccharose dans les tiges alors que le glucose, l'acidité et la teneur en eau diminuent. Lorsque les bourgeons latéraux commencent à se former, les tiges se dessèchent progressivement en même temps que le taux de saccharose et la pureté diminuent dans les tiges.

-La récolte et la repousse : une fois la maturité de la canne atteinte, la récolte peut se faire. Dans un premier temps, le choux blanc qui constitue la partie supérieure de la canne est coupé et les feuilles retirées. On ne conserve que la tige nue. Au niveau du sol restent alors un pied racinaire de canne qui reprendra au stade la levée peu de temps après la coupe. Un nouveau sous cycle recommence alors (Figure 3).

I-1-2 Milieu naturel

Les conditions climatiques et pédologiques influencent le bon développement de la canne ainsi que sa répartition géographique sur l'île. La partie qui suit donne un aperçu sur la climatologie de La Réunion.

Etant située à une latitude d'environ 21°Sud, l'île de La Réunion bénéficie d'un climat dit tropical. Cependant à l'échelle de l'île (environ 2500 km² en superficie), ce climat n'est pas homogène et peut être divisé en micro-climats. Différents facteurs peuvent expliquer ce contraste climatique, comme par exemple le fort relief, sa position océanique et son exposition aux courants atmosphériques au dessus de l'océan Indien. En effet, le régime régulier d'alizés (vents d'est dominants) coupe ainsi l'île en deux parties selon une diagonale Nord-Ouest/Sud-est : on retrouve donc une zone Nord-Est dite « au vent » et une zone Sud-Ouest dite « sous le vent ». Ainsi, la partie Est de l'île est très pluvieuse avec en moyenne une pluviométrie située entre 2000 et 8000mm, alors que la partie Ouest est considérée comme une zone sèche avec seulement 600 à 2000mm de précipitations en moyenne par an.

D'un point de vue plus général, cette île connaît deux saisons principales dans l'année. Une saison sèche et fraîche entre mai et octobre, et une saison chaude et humide de novembre à avril. Les besoins en rayonnement et en eau de la canne imposent donc des plantations en fin d'année et une récolte entre juillet et décembre.

I-1-3 Parcelles de référence

Dans le cadre de cette étude, nous avons travaillé sur une exploitation composée d'une trentaine de parcelles de canne à sucre située au Nord-Est de l'île (latitude : entre 20°53' S et 20°56' S ; longitude : entre 55°34' E et 55°36' E) (Figure 4). Les parcelles sont toutes recouvertes par la même variété de canne à sucre (R579) (voir encadré ci-dessous) sur une superficie d'environ 5 hectares. Elles sont situées à une altitude de 35m pour celles situées le plus proche de la côte et de 235m pour les plus éloignées de la côte. On peut considérer que nos parcelles de références présentent une surface plane avec une pente régulière de 10%. D'un point de vue pédologique, d'après la carte morpho-pédologique à l'échelle 1/50000 (Raunet, 1991), l'ensemble des parcelles de l'exploitation se situe sur un même type de sol (ferrallitique ; composition riche en fer et alumine), elles ont donc à priori les mêmes conditions d'alimentation minérale.

Variété de canne à sucre R579 : (référence web : www.canne-progres.com)

Elle est cultivée en régions littorales humides ou irriguées (Nord-Est et Est de l'île), car ces zones géographiques présentent des conditions météorologiques favorables à une repousse très vigoureuse et une croissance rapide de la canne. Cette dernière est caractérisée par une très faible floraison dans les conditions normales, de ce fait sa richesse en sucre est moyenne à forte en milieu et fin de campagne. C'est une variété appréciée par les agriculteurs car elle n'est pas sensible aux maladies graves (pouvant être causées par des virus (ex : mosaïque), bactérie (ex : rabourgrissement) ou moisissure (ex : charbon)). De même, elle peut être facilement récoltée soit manuellement soit par mécanisation car ses tiges sont droites et les restes de tiges en terre résistent aux piétinements des engins. Cependant cette variété reste assez sensible au cyclone (tiges facilement cassées).

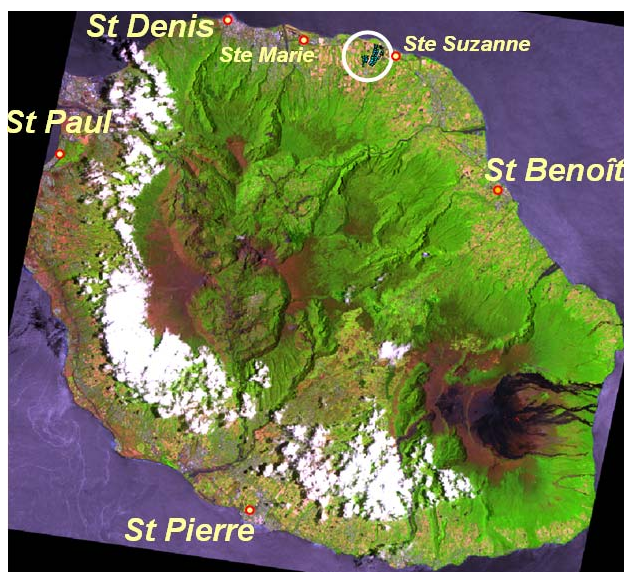


Figure 4 : Localisation du site d'étude (exploitation de B.Caruel)(cercle blanc ; image SPOT du 11/12/2006.

I-2 Sources des données de télédétection

I-2-1 Données RADAR

I-2-1-1 Principe

L'imagerie hyperfréquence appelée plus couramment RADAR (Radio Detection and Ranging), correspond à un mode d'acquisition actif. En effet, son système se compose d'une antenne émettrice/réceptrice qui envoie des ondes électromagnétiques avec une fréquence (ou longueur d'onde) donnée en direction de la surface terrestre et enregistre l'onde réfléchiée par la surface. Le signal retour dépend quant-à lui de plusieurs facteurs : paramètres instrumentaux et propriétés de la cible en surface. En effet, la longueur d'onde (ou fréquence), le mode de polarisation (plan dans laquelle l'onde est émise et reçue) et l'angle d'incidence sous laquelle a été émise l'onde (Figure 5), jouent un rôle important dans la caractéristique du signal retour. D'autre part, la géométrie (taille, rugosité) de la cible et sa teneur en eau, ainsi que la topographie de surface (relief, pente forte) vont influencer sur les phénomènes d'interaction (diffusion de surface, de volume, réflexion, absorption, transmission, réfraction) entre le signal RADAR incident et la cible au sol. Le signal RADAR retour contient alors des informations sur la « géométrie (taille, rugosité) » et l'humidité de surface (sur les premiers

centimètres selon la longueur d'onde) de la cible (si la cible est dépourvue de végétation). Comme on peut le voir, l'interprétation des images RADAR est moins intuitive de celle des images optiques pour lesquelles les objets sont caractérisés par leur signature spectrale.

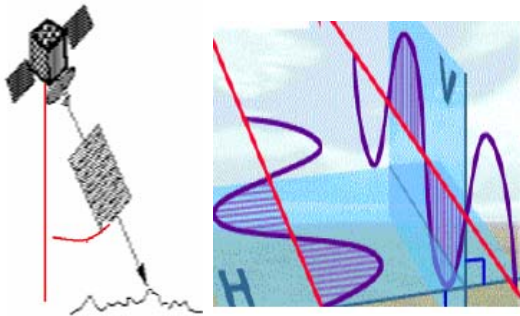


Figure 5 : Géométrie d'acquisition du signal RADAR. À droite l'angle d'incidence. À gauche, la polarisation : plan dans lequel l'onde est émise : H (Horizontale : dans le plan du champ électrique), V (verticale : perpendiculairement au champ électrique).

Pour notre cas d'étude, il est donc intéressant d'analyser le signal rétrodiffusé des parcelles de référence avec des RADAR à synthèse d'ouverture (ou encore SAR: Synthetic Aperture RADAR), car ceux-ci permettent des configurations multiples de polarisation et d'angle d'incidence. Ainsi, nous avons choisi d'étudier le cas de trois types de capteurs hyperfréquences satellitaires : ALOS/PALSAR, ASAR/ENVISAT et TERRASAR-X, qui ont des longueurs d'onde différentes. Leurs caractéristiques respectives sont présentées ci-après.

I-2-1-2 Capteurs RADAR

Images ALOS/PALSAR

Le satellite d'observation japonais ALOS (Advanced Land Observation Satellite) fut lancé en 2006. Il est équipé de trois systèmes d'acquisition lui permettant d'acquérir à la fois des images optiques et RADAR.

A son bord deux capteurs optiques : PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) et AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer (2nd generation)) et un capteur hyperfréquence PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar ; 23cm de longueur d'onde). Les caractéristiques principales sont dans le [tableau 1](#). On note toutefois que l'ensemble de nos images ALOS sont acquises avec des angles d'incidence moyens à forts (de 38.7° à 47.3°), avec des pixels de 6.25 et 12.5m et avec une seule polarisation (HH) ou avec deux polarisations simultanément (HH et HV).

Images ASAR/ENVISAT

Le capteur ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) lancé à bord du satellite ENVISAT en 2002, fonctionne en bande C soit une longueur d'onde d'environ 6cm (voir caractéristiques [Tableau1](#)). Les images ASAR analysées dans le cadre de cette étude ont une taille pixel de 12.5m, et ont été acquises en mode multi polarisation (HH et HV, HH et VV, ou VV et VH).

Images TERRASAR-X

Il s'agit d'un RADAR récent lancé en juin 2007 ([Fritz .T, 2007](#)), pouvant fournir des images à très haute résolution spatiale soit environ 1m. Les images sont acquises en bande X soit une longueur d'onde d'environ 3 cm (voir caractéristiques [Tableau1](#)). Nos images

TERRASAR-X ont été acquises en polarisation HH, avec des angles d'incidence compris entre 32.9° et 52.7° (Tableau 1).

Pays	Capteur	Bande	Incidence	Polarisation	Résolution (m)	Fauchée (km)	Revisite (jours)	Service
Europe	TERRASAR-X	X (9.6GHz ~3cm)	15 à 60	HH, VV, HV, VH	1 à 3.5	10-100	1	2007
	ASAR	C (1.2GHz~23cm)	15 à 45	HH, VV, HV, VH	30 à 1000	56-400	35	2002
Japon	PALSAR	L (5.3GHz~6cm)	8 à 60	HH, VV, HV, VH	7 à 100	20-350	45	2006

Tableau 1 : Caractéristiques principales des capteurs RADAR étudiés dans cette étude

I-2-1-3 Prétraitement des données RADAR

Lors de l'acquisition des images RADAR, l'information contenue dans un pixel (fournie sous forme de compte numérique) n'est pas directement exploitable. Il faut transformer cette image en suivant plusieurs étapes :

-une *calibration radiométrique* qui consiste à transformer le compte numérique des pixels en valeur physique, c'est à dire en coefficient de rétrodiffusion (en décibel).

-un *géo-référencement* des images afin de donner des coordonnées géographiques à chaque pixel de l'image.

-un *filtrage* pour diminuer le bruit dans l'image (réduction du speckle/chatoiement).

Nous allons détailler l'intérêt de ces prétraitements ainsi que la méthode utilisée sous le logiciel de traitement d'image ERDAS/Imagine pour les appliquer à nos images.

Calibration radiométrique

L'antenne émet des impulsions d'ondes en direction de la terre, avec une certaine fréquence, qui correspond à une certaine énergie. L'onde arrivant au sol subit les phénomènes de réflexion, transmission et absorption. Par conséquent, l'énergie rétrodiffusée arrivant à l'antenne réceptrice n'est pas la même que celle émise. L'équation reliant le rapport des énergies reçue/envoyée aux paramètres propres à l'instrumentation du capteur ainsi qu'aux caractéristiques de la surface est la suivante (Girard et Girard, 1999) :

$$Pr/Pe = (\lambda/4\pi^3) \cdot (Ge \cdot Gr) / R^4 \cdot \sigma_0 \cdot S$$

Avec :

Pr : Puissance reçue

Pe : Puissance émise

λ : Longueur d'onde

R : Distance entre la surface visée et l'antenne

; Ge : Gain de l'antenne d'émission

; Gr : Gain de l'antenne de réception

; σ_0 : Pouvoir réflecteur par unité de surface éclairée

; S : Aire de la trace au sol

Où les termes :

$(\lambda/4\pi^3) \cdot (\text{Ge-Gr})/R^4$ correspond aux caractéristiques de l'instrument.

σ_0 correspond au coefficient de rétrodiffusion (σ°) qui est le paramètre physique étudié dans cette étude et qui doit être extrait.

Ainsi, la calibration radiométrique permet de calculer le coefficient de rétrodiffusion (en décibel) à partir du compte numérique contenu dans les pixels de l'image RADAR. Cette transformation est propre au type de capteurs RADAR :

Images TERRASAR-X ([Fritz, 2007](#)) :

$$\sigma_i^\circ (dB) = 20\log_{10} DN_i + 10\log_{10} (CalFact) + 10\log_{10} (\sin(\theta_i))$$

Images ASAR/ENVISAT ([BestW software, 2005](#)):

$$\sigma_i^\circ (dB) = 20\log_{10} DN_i - 10\log_{10} (K) + 10\log_{10} (\sin(\theta_i))$$

Images ALOS/PALSAR ([ALOS products, 2007](#)):

$$\sigma_i^\circ (dB) = 20\log_{10} DN_i + Kdb$$

Où: - $\sigma_i^\circ (dB)$ est le coefficient de rétrodiffusion en décibel.

- DN_i (**Digital Number**) : correspond à l'amplitude du signal rétrodiffusé codé dans chaque pixel i de l'image (compte numérique).

- **Calfact** est le coefficient de calibration pour les images acquises avec le capteur TERRASAR-X, et qui est compris entre 10^{-4} et 10^{-6} . Sa valeur dépend de l'angle d'incidence ainsi que de la polarisation.

- **K** est la constante absolue de calibration pour les images acquises avec le capteur ASAR. Elle dépend aussi de l'angle d'incidence.

- **Kdb** est la constante de calibration pour les produits PALSAR L1.5. $Kdb = -83dB$.

Ces calculs ont été automatisés sous le logiciel de Traitement d'image ERDAS/Imagine (Module Modeler) ([Annexe 1](#)).

Géo-référencement

Cette procédure permet une localisation géographique précise de tous les points de l'image. Elle est nécessaire avant tout traitement de l'image RADAR. Elle consiste à prendre des points d'amer (points GPS par exemple), facilement reconnaissables sur l'image RADAR, comme des croisements de route, des coins de champs etc, et de renseigner leurs coordonnées géographiques respectives obtenues sur des documents de référence. Pour cette étude, nous avons utilisé une image SPOT déjà géoréférencée pour géoréférencer nos images RADAR.

La qualité du géo-référencement va dépendre de la précision de la localisation des points, de leur nombre ainsi que de leur répartition spatiale dans l'image.

Filtrage

L'image RADAR contient du bruit appelé couramment « speckle » ou encore chatoiement. Ce phénomène se produit lorsque le signal incident intercepte une surface constituée de plusieurs éléments diffusifs. Par le phénomène de diffusion multiple, les éléments diffusifs contenus dans une cellule de résolution vont alors chacun réfléchir en partie

le signal incident. On a alors des interférences à la fois constructive et destructives. C'est ce qui produit dans l'image cet aspect granuleux poivre et sel.

Cet effet parasite ne peut être entièrement éliminé, mais peut être diminué de manière satisfaisante avec l'application sur l'image radar d'un filtre. Une multitude de filtres existe, et le choix de celui-ci dépend en partie de ce qu'on souhaite effectuer comme analyse. Dans notre cas, nous avons utilisé un filtre Médian 5x5 linéaire. Il s'agit d'une fenêtre de taille 5 x 5 pixels qu'on applique sur l'image. Le pixel central de la fenêtre est remplacé par la médiane de la fenêtre. Cela permet de lisser l'image et de réduire le niveau de bruit. On doit cependant bien comprendre que n'importe quel filtre implique forcément une perte d'information.

L'ensemble des informations précédentes montre bien que les images RADAR forment une catégorie à part entière en imagerie satellitaire. Comme on a pu comprendre, le signal RADAR rétrodiffusé par les parcelles d'étude va dépendre à la fois des paramètres d'acquisition du capteur (longueur d'onde, angle d'incidence, polarisation) qui peuvent être connus dans les fichiers d'acquisition fournis avec les fichiers images, et de la nature biophysique des parcelles. Il est nécessaire d'avoir, par conséquent des informations supplémentaires sur l'état des parcelles. Ces informations (principalement le stade de développement des cultures) sont obtenues par imagerie optique.

I-2-2 Données optiques

Les images optiques sont en effet plus largement utilisées pour étudier les parcelles cultivées car elles permettent de mettre en évidence l'activité chlorophyllienne ainsi que la teneur en eau des plantes. Etant donné que les ondes émises ou réfléchies par la surface sont enregistrées à des longueurs d'onde données, il est possible de connaître la signature spectrale d'un objet en particulier (Tableau 2a). Les végétaux sont caractérisés par une réponse spectrale importante dans le proche infra rouge (0.78µm à 1.4µm) contrairement aux longueurs d'onde du visible (0.4µm à 0.75µm). Ce phénomène s'explique durant le processus de photosynthèse qui permet aux plantes chlorophylliennes de transformer l'énergie solaire incidente en matière organique. L'énergie nécessaire pour cette transformation est de l'ordre de $2.83 \cdot 10^{-19}$ Joules (J). Les photons incidents transportent une certaine énergie sous la forme suivante : $E = h \cdot c / \lambda$ où h est la constante de Planck ($6.626 \cdot 10^{-34}$ J.s), c la vitesse de la lumière dans le vide ($2.99 \cdot 10^8$ m/s) et λ la longueur d'onde. Ainsi, tous les photons incidents ayant une énergie correspondant à des longueurs d'onde inférieures à 0.7µm sont absorbés par les plantes pour la photosynthèse. Ainsi, selon le stade végétatif de la canne, celle-ci a une réponse spectrale très faible dans le visible mais importante dans le proche infra rouge. L'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est utilisé pour étudier le développement des cultures via la télédétection spatiale ou aéroportée. Il s'agit du rapport de la différence entre le Proche infra rouge (PIR) et le rouge (R) divisée par la somme des deux bandes.

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$$

La connaissance d'un tel paramètre physique au niveau des parcelles de canne à sucre permet d'évaluer le développement végétatif de la canne. On dispose pour cela d'images SPOT 4 et 5 acquises entre la fin 2006 et le début 2008 (Tableau 2b). Les canaux à bords des satellites SPOT sont les suivants : bande 1 : 546,1nm (vert), bande 2 : 620-700nm (Rouge) MIR, bande 3 : 0,7µm à 1,4µm (Proche Infra Rouge) et la bande 4: 1,5 à 3µm (Moyen Infra

Rouge). En calculant le NDVI moyen pour chaque parcelle et pour chaque date d'acquisition, on va pouvoir établir une sorte de vérité terrain pour chaque parcelle au cours du temps (partie I-3-1).

pays	systèmes	capteur	bande	résolution (m)	fauchée (km)	service
France	SPOT4	HRVIR	PAN (rouge) VIS, PIR, MIR	10 20	60 à 80	1998
	SPOT5	HRG	PAN VIS, PIR, MIR	2.5 à 5 10		2002

(a)

Type	Date acquisition	Type	Date acquisition
SPOT 5	28/09/2006	SPOT 5	16/07/2007
SPOT 5	14/10/2006	SPOT 4	03/09/2007
SPOT 4	11/12/2006	SPOT 5	12/10/2007
SPOT 5	21/01/2007	SPOT 4	20/10/2007
SPOT 5	14/03/2007	SPOT 4	20/11/2007
SPOT 4	30/04/2007	SPOT 5	14/12/2007
SPOT 4	11/05/2007	SPOT 5	15/01/2008
SPOT 4	12/06/2007	SPOT 4	27/02/2008

(b)

Tableau 2 : (a) Caractéristiques des données SPOT 4 et 5. (b) Dates d'acquisition des images SPOT

I-3 Méthode d'analyse

I-3-1 Paramètres étudiés

Durant son cycle de croissance, la canne évolue autant dans sa morphologie que dans sa composition en fibre, teneur en eau, concentration en sucre. Notre étude portant sur la caractérisation des états de surface des parcelles cannières, nous avons sélectionné un jeu de parcelles présentant différents états contrastés :

-*sol nu labouré*. Celui-ci présente une certaine rugosité de surface qui dépend du type de travail effectué (labour, passage du disque...).

-*sol recouvert par de la canne*. En connaissant la cinétique de croissance de la canne, il est possible alors d'estimer la hauteur de celle-ci à une date donnée après la coupe. Cette dernière va être déterminée pour l'ensemble des parcelles de référence.

-*canne coupée* : une fois la canne récoltée, il ne reste que les résidus de canne et le sol est relativement plan sans rugosité particulière.

Ces différentes classes correspondent chacune à des stades particuliers dans le cycle de la canne, et à des morphologies et des activités chlorophylliennes différentes. Ainsi, avec les images optiques SPOT, on peut les identifier en calculant l'indice de végétation NDVI.

Avec les images RADAR, le signal comprend une part d'information sur la géométrie de surface de l'objet étudié.

Notre objectif est de relier le coefficient de rétrodiffusion au niveau de développement végétatif via le NDVI.

Ces paramètres ont pu être extraits pour chacune des parcelles et à chaque date d'acquisition des images SPOT ou RADAR (TERRASAR-X, ALOS/PALSAR, ASAR/ENVISAT). Pour cela, des outils spécifiques de traitement d'image du logiciel ERDAS Imagine ont été utilisés.

Extraction du coefficient de rétrodiffusion moyen pour chaque parcelle

Un outil du logiciel ERDAS, « zonal attribut » ([Annexe 2](#)), permet de calculer des statistiques (moyenne, écart type, etc) pour chaque objet surfacique du fichier vecteur qui contient nos parcelles de référence. Pour notre étude on souhaite extraire le coefficient de rétrodiffusion moyen par parcelle, ce qui revient à faire la moyenne du coefficient de rétrodiffusion en linéaire dans un premier temps, puis de transformer cette valeur en décibel (cf encadré). La relation permettant ces conversions : linéaire/ décibel et inversement sont les suivantes :

$$\sigma^{\circ}_{lin} = 10^{(\sigma^{\circ}_{dB}/10)} \text{ et } \sigma^{\circ}_{dB} = 10 \log_{10} (\sigma^{\circ}_{lin})$$

En linéaire		$\sigma^{\circ} moy(lin) = \frac{\sigma^{\circ} lin1 + \sigma^{\circ} lin2 + \sigma^{\circ} lin3 + \sigma^{\circ} lin4}{4}$ <p>En effectuant, la conversion en décibel, on obtient :</p> $[\sigma^{\circ} moy(lin)]_{dB} = 10[\log(\sigma^{\circ} lin1 + \sigma^{\circ} lin2 + \sigma^{\circ} lin3 + \sigma^{\circ} lin4) - \log(4)]$ $[\sigma^{\circ} moy(lin)]_{dB} = 10[\log(\sigma^{\circ} lin1 * \sigma^{\circ} lin2 * \sigma^{\circ} lin3 * \sigma^{\circ} lin4) - \log(4)]$
$\sigma^{\circ} lin_1$	$\sigma^{\circ} lin_2$	
$\sigma^{\circ} lin_3$	$\sigma^{\circ} lin_4$	
En décibel		$\sigma^{\circ} moy(dB) = \frac{\sigma^{\circ} dB1 + \sigma^{\circ} dB2 + \sigma^{\circ} dB3 + \sigma^{\circ} dB4}{4}$ $\sigma^{\circ} moy(dB) = \frac{10(\log \sigma^{\circ} lin1 + \log \sigma^{\circ} lin2 + \log \sigma^{\circ} lin3 + \log \sigma^{\circ} lin4)}{4}$ $\sigma^{\circ} moy(dB) = \frac{10[\log(\sigma^{\circ} lin1 * \sigma^{\circ} lin2 * \sigma^{\circ} lin3 * \sigma^{\circ} lin4)]}{4}$ <p style="text-align: center;">$\sigma^{\circ} moy(dB) \neq [\sigma^{\circ} moy(lin)]_{dB}$</p>
$\sigma^{\circ} dB_1$	$\sigma^{\circ} dB_2$	
$\sigma^{\circ} dB_3$	$\sigma^{\circ} dB_4$	

Extraction de l'indice de végétation NDVI moyen pour chaque parcelle

Nous disposons de 16 images optiques SPOT prises à 16 dates différentes, et corrigées des problèmes atmosphériques par le CNES. Dans un premier temps, nous avons traduit les valeurs de réflectance en indice de végétation (NDVI). Dans un second temps, par croisement avec la couche du parcellaire, nous avons calculé la valeur moyenne de NDVI de chaque parcelle (fonction « zonal attribute » sous ERDAS/Imagine) à chaque date ([Figure 6](#)).

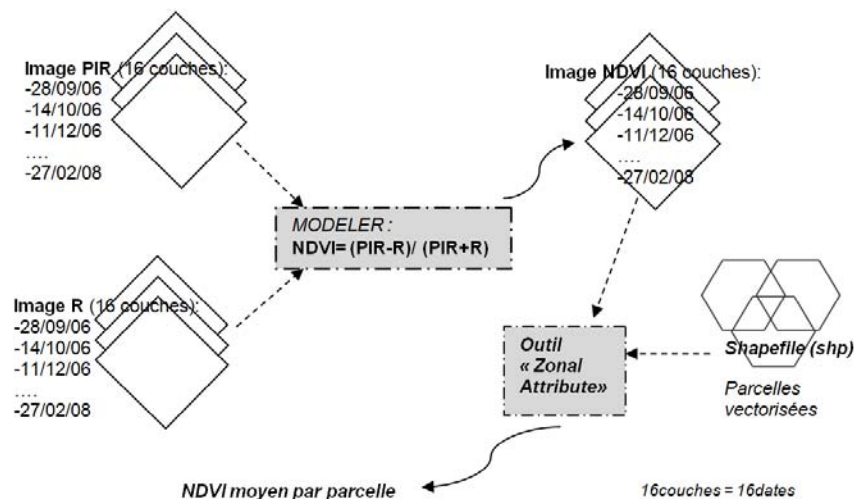


Figure 6: Méthodes de calcul et d'extraction de l'indice de végétation NDVI moyen par parcelle

Nous disposons ainsi d'un jeu de données relativement complet correspondant à une grande variété d'états de surface des parcelles. En effet, le coefficient de rétrodiffusion est sensible à la teneur en eau de surface ainsi qu'à la rugosité, le NDVI aux caractéristiques physiologiques de la culture dépendant des interventions culturales et des conditions de croissance.

Pour pouvoir interpréter correctement les valeurs extraites de coefficient de rétrodiffusion et de NDVI, de manière relative entre parcelles ou dans le temps, il est important de disposer de données complémentaires.

I-3-2 Données complémentaires et données de croissance simulées du modèle MOSICAS

Plusieurs types de données viennent compléter notre base de données afin de renseigner au mieux l'état des parcelles à une date précise ou encore interpréter des valeurs particulières. Nous avons recueilli les informations suivantes :

Observations de terrain sur les parcelles de référence : Deux séries d'observation ont été effectuées. La première entre le 15 et le 18 janvier 2008 sur 15 parcelles de notre site d'étude (Voir détails [Annexe 3](#) et [figure 7](#)). Plusieurs informations ont été relevées sur le terrain : la pente de la parcelle, la rugosité du sol, l'état de la culture (repousse, labour, coupe...), la hauteur de la canne, une observation qualitative de l'humidité superficielle du sol ainsi que des remarques sur la présence de paillis, l'homogénéité de la parcelle ou encore la trace des sillons pouvant être laissés par le passage des machines. La deuxième pendant les mois de mai et de juin 2008, avec cette fois-ci des mesures uniquement de hauteur de la canne prises aux quatre coins de l'ensemble des parcelles.

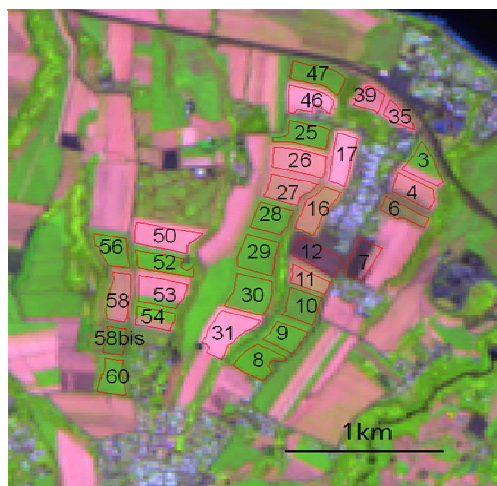


Figure 7 : Parcelles de références ; Image SPOT (20/10/07)

Itinéraire culturel : Nous avons recueilli auprès de l'exploitant et pour chaque parcelle :

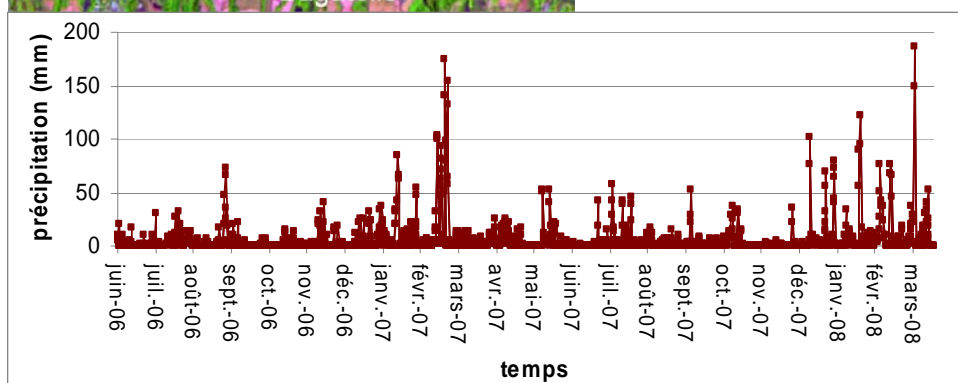
- la date de récolte
- la variété cultivée
- la production récoltée

Cette information sert à reconstituer le cycle de croissance des parcelles ([Annexe 4](#)). On note cependant que toutes les dates ne sont pas précises au jour près. En effet, la récolte d'une parcelle peut s'étaler sur plusieurs jours voire semaines. Nous ne disposons que de la date où la parcelle est entièrement coupée.

Données de précipitations : Le signal RADAR étant sensible à l'humidité superficielle de surface, connaître les jours de précipitations importantes peut aider à interpréter le signal RADAR. Le CIRAD gère un réseau d'une cinquantaine de stations climatiques couvrant l'ensemble des bassins canniens. Ces données sont stockées dans une base de données actualisées quotidiennement et accessible via un réseau informatique interne (application « GESMET»). Les stations météorologiques choisies pour notre étude sont les suivantes : Bagatelle et Grand Hazier pour la pluviométrie, et la station de La Mare plus complète qui fournit en plus des mesures de température (minimale, maximale), et de rayonnement global. Ces trois stations se situent à 3-4 kilomètres de distance du site de référence ([Figure 8a](#)). La figure 8b montre les précipitations enregistrées par les trois stations de la fin de l'année 2006 au début de l'année 2008. On retrouve les deux saisons principales de l'île : la saison « sèche et fraîche » de Mai à Octobre et la saison « chaude et humide » de Novembre à Avril. Par ailleurs ces données climatiques sont utilisées par le modèle de croissance MOSICAS.



Figure 8: a. localisation des trois stations météorologiques Bagatelle, La Mare, Grand Hazier autour des parcelles de références (contour rouge) .b : données de précipitation obtenues sur les trois stations météorologiques.



Le modèle MOSICAS et les données de croissance simulées: Le modèle MOSICAS permet de simuler la croissance de la canne à sucre et fait appel à SIMULEX qui est une plate forme d'aide à la gestion des données (Vignais G et Martiné JF, 2004). Il s'agit d'un modèle biophysique et dynamique à pas de temps journalier, permettant de simuler la croissance de la biomasse (teneur en sucre, rendement...) pour une parcelle donnée. Ce modèle thermo radiatif est de type « Big leaf », c'est-à-dire qu'il considère chaque parcelle comme une unique feuille homogène. Par ailleurs, ce dernier comprend un module de bilan hydrique pour tenir compte des contraintes en alimentations hydriques (stresses hydriques). Les données d'entrée incluent également des données caractérisant le sol (réserve utile, profondeur d'enracinement) et les pratiques agricoles (dates de plantation et de récolte, variété et irrigation) (Figure 9).

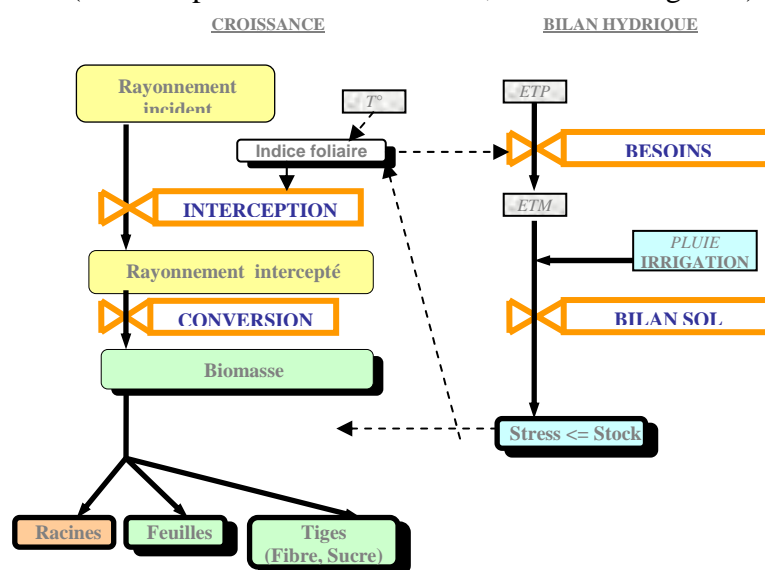


Figure 9 : Schéma du modèle de simulation de croissance MOSICAS

Ce modèle permet donc de calculer l'évolution de certains paramètres biophysiques tels que l'indice de l'indice foliaire (LAI), l'efficacité d'interception (EI)*, la hauteur au niveau de la dernière ligule (HTVD)* etc, mais aussi de faire des estimations de richesse en sucre et de rendement. Pour notre étude, le facteur qui nous intéresse avant tout est la teneur en eau dans la canne, car le coefficient de rétrodiffusion est sensible à la teneur en eau et l'indice de végétation NDVI peut être indirectement lié à cette teneur en eau selon l'avancement de la canne dans son cycle. Ainsi, les simulations sur MOSICAS nous ont permis d'estimer la teneur en eau des tiges (% eau) en utilisant les deux paramètres suivants :

$$\% \text{ eau} = 1 - (\text{rdcan} / (100 * \text{mstigusi})).$$

Avec :

-rdcan : Rendement canne (tonnes /ha de matière fraîche de tige)

-mstigusi : Matière sèche des tiges usinables (g/m2)

I-3-3 Relation entre mesures RADAR et optiques, et variables culturales

Nous avons établi des relations entre les mesures RADAR et les grandeurs biophysiques suivantes : hauteur de la culture, NDVI et teneur en eau des tiges.

Dates de coupe et hauteurs de canne mesurées :

La relation hauteur/âge de la canne va nous permettre d'extrapoler la hauteur de canne estimée pour une parcelle donnée à la date d'acquisition d'une image (optique ou RADAR). En connaissant les dates de récolte, et de plantation (pour les parcelles qui ont été labourées), il est possible de connaître l'âge de la canne à n'importe quelle date. Nous nous sommes appuyés sur les mesures de terrain effectuées entre le 19 et le 26 mai pour estimer la cinétique de croissance (figure 10). Nous notons que cette dernière aurait pu être déterminée aussi avec le modèle MOSICAS. Cependant ce dernier fait ses simulations pour une variété de canne à sucre donnée (R570) qui est différente de celle présente sur l'exploitation (R579). Les mesures terrain étant disponibles, elles ont été préférées car sont propres à l'exploitation, et reflètent alors l'influence des facteurs externes.

Ainsi, nous obtenons la cinétique de croissance suivante pour nos parcelles de références :

- durant les cinq premiers mois de son cycle : 40-50cm/mois.
- entre le sixième et le huitième (voir neuvième mois) : 10-15cm/mois.
- du neuvième mois jusqu'à la fin de son cycle : 5-10cm/mois.

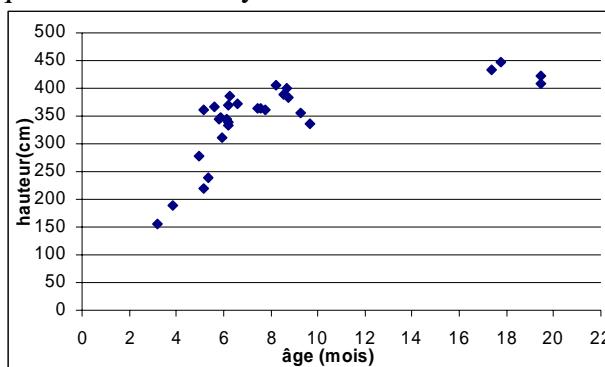


Figure 10 : Hauteur de la canne à sucre (mesurées sur les parcelles) en fonction de son âge (nombre de jours après la dernière coupe)

*Efficacité d'interception : $EI = PAR / PAR_i$; avec PAR : Rayonnement utile incident (MJ/m^2)
et PAR_i : Rayonnement utile intercepté (MJ/m^2)

*HTVD : Hauteur mesurée au niveau de la dernière ligule de la tige

Signal RADAR et hauteur de canne mesurée :

L'objectif est d'évaluer la sensibilité du signal des trois capteurs RADAR (TERRASAR-X, ALOS/PALSAR, ASAR/ENVISAT) à la hauteur de la canne. Etant donné que les mesures de terrains ont été effectuées le 15 et le 18 janvier 2008, les images RADAR doivent être acquises à des dates relativement proches afin d'avoir une interprétation correcte entre les valeurs des coefficients rétrodiffusés et les valeurs de hauteurs mesurées. Ainsi, les images RADAR choisies sont les suivantes :

- capteur TERRASAR-X : images du 13/01/08 (52.7°) et du 18/01/08 (38.7°), car elles ont été acquises avec deux angles d'incidence différents.
- capteur ASAR/ENVISAT : image du 16/01/08.
- capteur ALOS/PALSAR : image du 06/02/08. Pour cette date, les hauteurs de canne ont été ajustées grâce à la cinétique de croissance vue précédemment.

Signal RADAR, indice de végétation NDVI et teneur en eau de la canne:

Dans un premier temps, nous avons réalisé une étude synchronique du signal des trois capteurs RADAR (TERRASAR-X, ALOS/PALSAR, ASAR/ENVISAT). Nous nous sommes intéressés aux valeurs relatives du coefficient de rétrodiffusion pour une date d'acquisition. Comme les parcelles présentent des états culturaux différents, il est intéressant par conséquent de regarder si les valeurs du coefficient de rétrodiffusion sont cohérentes avec les états culturaux (cannes coupées, sol labouré, canne mature). Ces états peuvent être approchés avec les valeurs de NDVI, durant les quatre premiers mois du cycle car à partir de ce stade de croissance le NDVI commence à saturer à 0.8. De la même manière, durant la croissance de la canne à sucre, la teneur en eau dans les tiges diminue et atteint un seuil minimal à la fin de la phase de maturation. Il est intéressant donc d'étudier les valeurs de coefficient de rétrodiffusion avec en parallèle celles du NDVI.

Dans un second temps, nous avons réalisé une étude diachronique du coefficient de rétrodiffusion grâce aux données acquises par le capteur ALOS/PALSAR. En effet, seul ce capteur présente des images acquises à un pas de temps régulier, et ce sur notre période d'observation (fin 2006 à début 2008). Toutefois, le signal RADAR présente la particularité de diminuer avec l'angle d'incidence, et les images ont été acquises avec plusieurs angles d'incidence aux différentes dates. De ce fait, on doit s'affranchir de la dépendance angulaire du signal afin d'étudier le signal RADAR dans le temps.

I-3-4 Suivi temporel du coefficient de rétrodiffusion : méthode de normalisation angulaire

Afin de pouvoir comparer les valeurs de coefficients de rétrodiffusion dans le temps et pour chacune des parcelles, une étape de normalisation des images doit être effectuée. La partie qui suit explique plus en détail cette étape.

Normalisation des données : réduction de la dépendance angulaire du signal

La méthode employée pour cette étude, est la suivante :

A l'échelle linéaire, le coefficient de rétrodiffusion peut s'écrire comme suit (Baghdadi et al, 2001):

$$\sigma^{\text{olin}}(\theta) = \beta \cdot \cos^\alpha(\theta) \quad (1)$$

où β est un coefficient qui dépend de la nature de la cible, α un coefficient qui dépend du mécanisme de diffusion dominant et du capteur et θ l'angle d'incidence.

Les coefficients de rétrodiffusion normalisés peuvent être définis comme suit :

$$\sigma^{\text{olin}}_N = \sigma^{\text{olin}} / \cos^\alpha(\theta) \quad (2)$$

Il nous faut alors déterminer la valeur de α afin de pouvoir calculer les coefficients de rétrodiffusion normalisés. La relation (1) peut s'écrire tel que :

$$10 \cdot \log_{10}(\sigma^{\text{olin}}) = 10 \cdot \log_{10}(\beta) + 10 \cdot \alpha \cdot \log_{10}(\cos(\theta))$$

Ce qui équivaut à :

$$\sigma^{\text{o}}_{\text{dB}} = b + \alpha \cdot x \quad (3)$$

$$\text{où : } b = 10 \log_{10}(\beta) \text{ et } x = 10 \log_{10}(\cos(\theta))$$

Nous obtenons une relation linéaire entre $\sigma^{\text{o}}_{\text{dB}}$ et $10 \log_{10}(\cos(\theta))$. Ainsi pour l'ensemble des cibles on peut tracer $\sigma^{\text{o}}_{\text{dB}}$ en fonction de $10 \log_{10}(\cos(\theta))$ et déterminer la valeur de la pente si la relation est vérifiée.

Les forêts ont un signal de rétrodiffusion relativement stable en fonction du temps. L'idéal serait donc de choisir ce type de cible pour déterminer les paramètres de l'équation 3 entre le signal RADAR et l'angle d'incidence. Un des problèmes rencontrés dans un premier temps est le manque de forêts suffisamment grandes à proximité des parcelles de référence. La cible choisie est alors un grand plateau recouvert de végétation qui se situe à la même longitude que les parcelles de référence (latitude moyenne : $21^\circ 1' 58.98''$ Sud ; longitude : $55^\circ 34' 16.40''$ Est) (Figure 11).

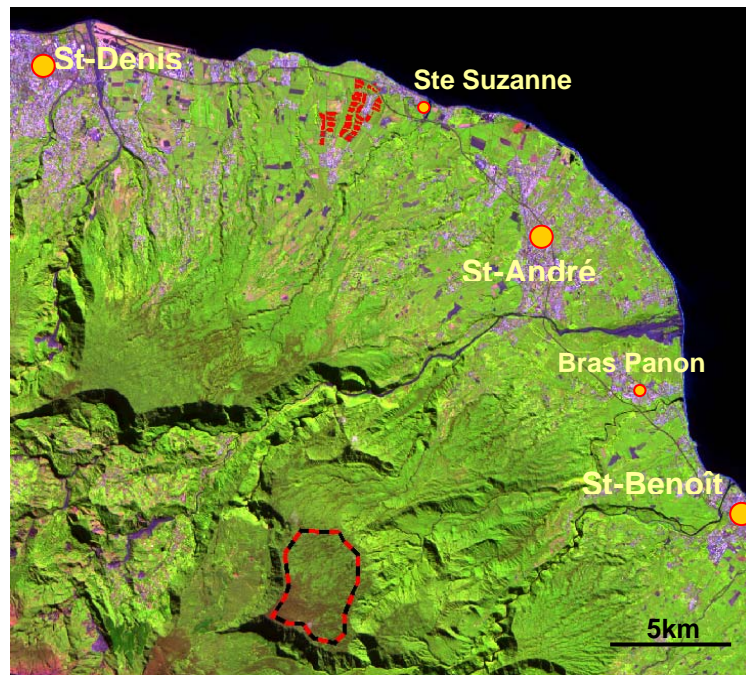


Figure 11 : Localisation de la cible choisie (pointillés rouge et noir) pour la normalisation des données (latitude : $21^\circ 1' 58.98''$ Sud ; longitude : $55^\circ 34' 16.40''$ Est) ; parcelles de référence à proximité de Ste Suzanne en rouge.

Pour chaque image ALOS/PALSAR, nous avons calculé le coefficient de rétrodiffusion moyen de cette cible en linéaire que l'on transforme ensuite en décibel. Les fichiers de métadonnées des images acquises par le capteur ALOS indiquent l'incidence au centre de l'image et celui au nadir. Quelque soit le mode de visée du satellite la différence entre l'angle de visée au nadir et celui au centre de l'image est de l'ordre de 6°. On ne peut alors pas se contenter de prendre comme valeur de l'angle d'incidence celle du centre de l'image (erreur de 6° pour les parcelles situées à l'extrémité de l'image). Nous avons donc calculé pour chaque image, l'angle d'incidence au niveau de la cible choisie pour la normalisation (Annexe 5). Les incidences obtenues sont fournies dans le tableau 3.

Type	Date acquisition	Angle d'incidence	Angle incidence cible normalisation	Mode acquisition	Polarisation
ALOS	05/10/2006	44,1°	40,5°	ASCENDING	HH, HV
	22/10/2006	47,3°	41,2°	ASCENDING	HH
	20/02/2007	44,1°	39,2°	ASCENDING	HH, HV
	19/04/2007	38,7°	34,5°	ASCENDING	HH
	23/05/2007	44,1°	40,5°	ASCENDING	HH, HV
	06/08/2007	38,7°	41,9°	ASCENDING	HH, HV
	04/09/2007	38,7°	34,5°	ASCENDING	HH, HV
	21/09/2007	38,7°	41,9°	ASCENDING	HH
	05/12/2007	38,7°	34,5°	ASCENDING	HH
	06/02/2008	38,7°	41,9°	ASCENDING	HH

Tableau 3: Angles d'incidence calculés au niveau de la cible choisie pour la normalisation des images ALOS/PALSAR.

La figure 12 montre la relation entre le σ^0 (dB) et le $\log_{10}(\cos(\theta))$ pour la polarisation HH.

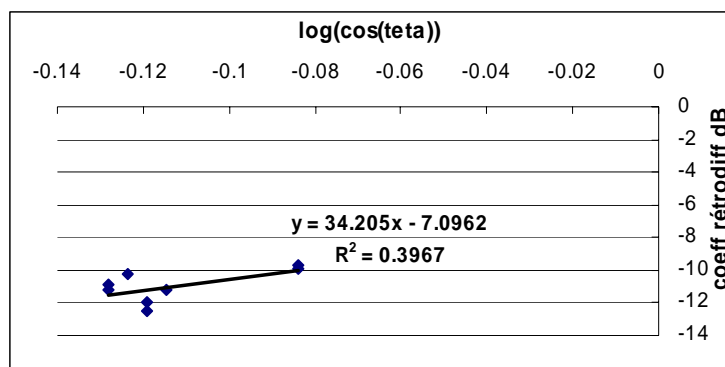


Figure 11 : Relation entre le coefficient de rétrodiffusion en décibel de la zone utilisée pour la normalisation de l'incidence RADAR et $\log_{10}(\cos(\theta))$.

D'après la figure 12, la pente α est égale à 3.4205. On utilisera cette valeur pour normaliser les coefficients de rétrodiffusion linéaires des parcelles pour chaque date. Par la suite, il suffit de transformer ces coefficients linéaires en dB par la formule :

$$\sigma_{dB}^0 = 10 \cdot \log_{10}(\sigma_{lin}^0)$$

II- Résultats et discussion

Dans un premier temps, pour les trois capteurs RADAR (TERRASAR-X, ALOS/PALSAR et ASAR/ENVISAT) nous avons, à une date d'acquisition donnée, essayé d'identifier si une relation de proportionnalité existe entre la valeur de σ_{dB}^0 et l'état cultural. Puis nous avons comparé σ_{dB}^0 des parcelles de référence à une date d'acquisition donnée avec différentes variables (hauteur de la canne, NDVI et teneur en eau). Ces analyses permettent de définir les configurations de polarisations, d'angle d'incidence et de longueurs d'onde optimales pour discriminer au mieux les classes de parcelles (sols nus et labourés, sols coupés, sol recouvert par de la canne). Dans un second temps, nous avons établi un suivi temporel du coefficient de rétrodiffusion σ_{dB}^0 .

II-1 Coefficient de rétrodiffusion et états culturaux des parcelles de référence.

La figure 13 (a, b et c) présente pour les dates d'acquisition du 13/01/08 (TERRASAR-X), du 05/10/06 (ALOS/PALSAR) et du 22/04/07 (ASAR/ENVISAT) les valeurs du coefficient de rétrodiffusion pour chaque parcelle de référence ainsi que les valeurs de NDVI (trait en pointillé).

Comme on peut le constater les valeurs de coefficient de rétrodiffusion élevées correspondent à des parcelles pour lesquelles le développement végétatif est avancé (fortes valeurs de NDVI). Par exemple, avec le capteur TERRASAR-X (13/01/08) (Figure 13a), les parcelles C12 et C3 ont des valeurs de σ^0 très faibles. En vérifiant les observations effectuées sur le terrain, on constate que la parcelle C3 était en cours de labour le 15 et le 18 janvier 2008 et ne présente pas de canne, alors que la parcelle C12 est recouverte par un début de repousse de canne de hauteur de l'ordre de 45cm. Par ailleurs, d'après les mesures de terrain, les parcelles ayant une hauteur d'environ 2m (C26, C27, C35, C39) ont des valeurs de σ^0 assez élevées pour les données du 13/01/08. Cette même relation de proportionnalité est également observée pour la date du 05/10/06 avec le capteur ALOS/PALSAR et celle du 22/04/07 avec le capteur ASAR/-ENVISAT (Figures 13 b et c).

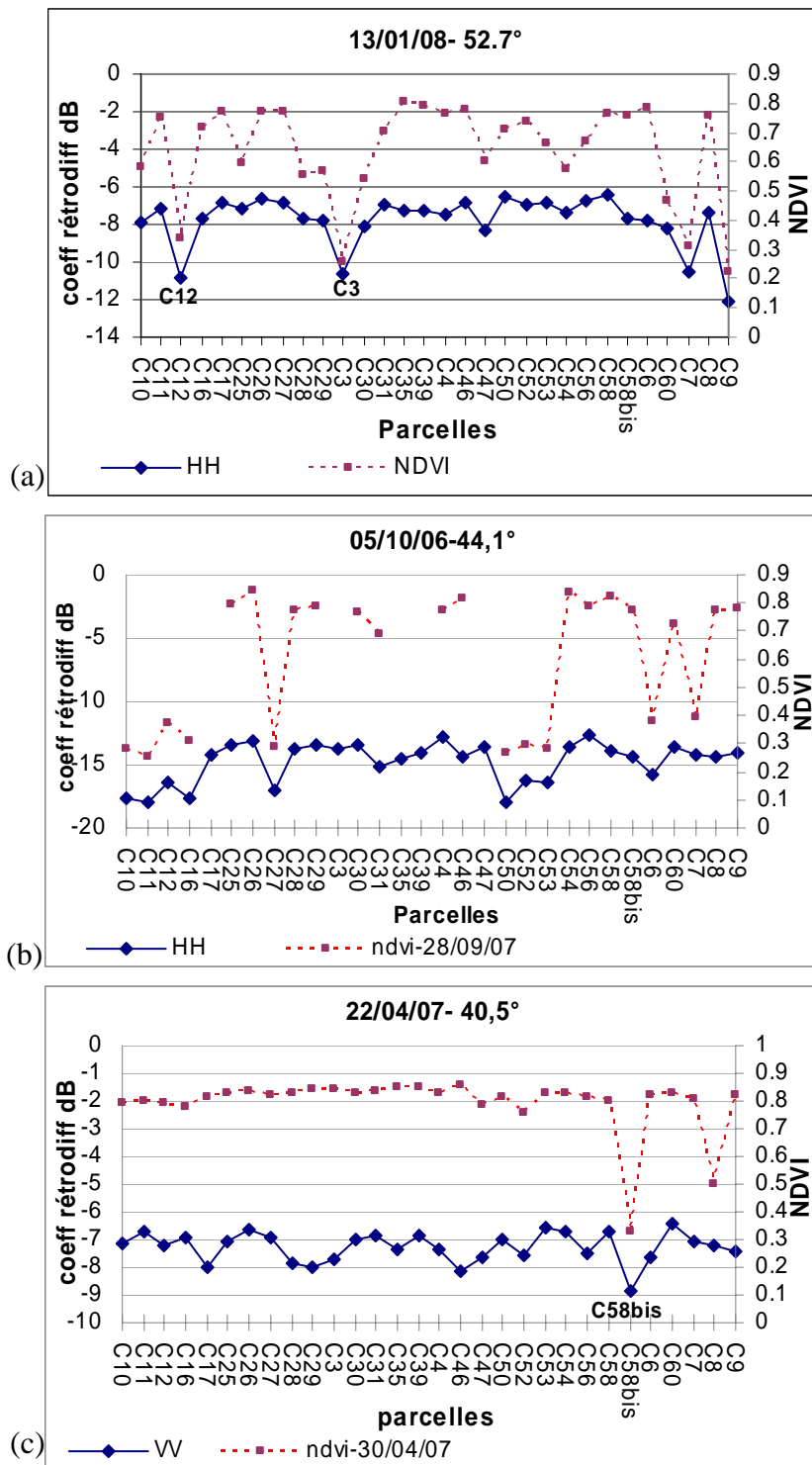


Figure 13 : Coefficient de rétrodiffusion et NDVI pour chaque parcelles de référence, à la date du 13/01/08 pour le capteur TERRASAR-X du 05/10/06 pour ALOS/PALSAR et du 22/04/07 pour ASAR/ENVISAT

II-1-Influence de la polarisation

Ce paramètre a pu être étudié de plus près pour les images acquises avec deux polarisations différentes. Le cas de l'image acquise par le capteur ALOS/PALSAR (23/05/07) permet de mettre en avant une sensibilité du signal RADAR relativement plus importante

avec une polarisation croisée qu'avec une polarisation parallèle. En effet, sur la [figure 14](#) on constate une dynamique du signal RADAR plus marquée en polarisation HV qu'en polarisation HH, cela s'observe au niveau de la différence entre les plus fortes valeurs de coefficient de rétrodiffusion (stade de croissance plus avancé) et les plus faibles valeurs de coefficient de rétrodiffusion (stade de croissance moins avancé).

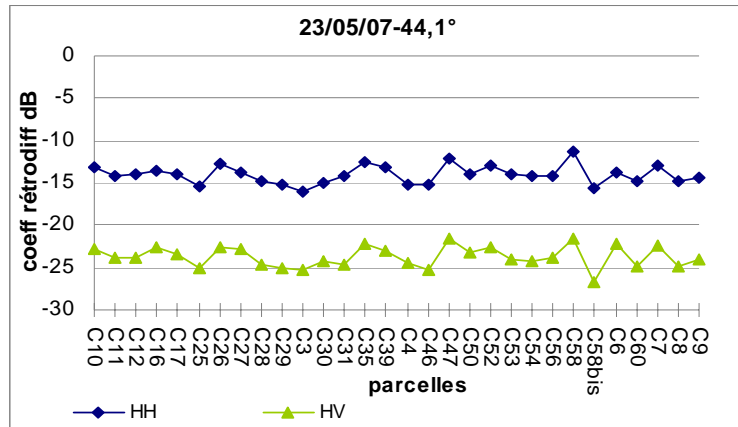


Figure 14 : Sensibilité du signal RADAR selon le type de polarisation. Image acquise le 23/05/07 par le capteur ALOS/PALSAR, avec un angle d'incidence de 44.1°, polarisation parallèle (HH), polarisation croisée (HV).

II-1-2 Influence de l'angle d'incidence

Ce paramètre influe fortement sur le coefficient de rétrodiffusion. En effet, pour une polarisation et une longueur d'onde données, le coefficient de rétrodiffusion d'une même cible sera plus élevé avec un angle d'incidence faible qu'avec un angle d'incidence fort. Ainsi, la valeur du coefficient de rétrodiffusion diminue avec l'angle d'incidence.

Avec les différentes images acquises avec les trois capteurs RADAR, on a pu observer différents points :

Tout d'abord, une dynamique du signal plus importante avec les angles d'incidence élevés. Pour les images acquises par le capteur TERRASAR-X le 13/01/08 avec $\theta = 52.7^\circ$ et le 18/01/08 avec $\theta = 38.9^\circ$ ([figure 15](#)), on observe bien que les valeurs de coefficient de rétrodiffusion les plus élevées correspondent à des états de croissance avancés de la canne et que les valeurs faibles correspondent à des cannes moins développées. Cependant avec l'image acquise avec $\theta = 52.7^\circ$, on observe une différence entre valeur σ° forte et valeur σ° faible plus importante : 5,63dB contre 3,6dB avec l'image acquise avec $\theta = 38.9^\circ$. Ainsi, la dynamique du coefficient de rétrodiffusion étant plus marquée avec un angle d'incidence fort, permet de mieux distinguer les états culturels des différentes parcelles de références.

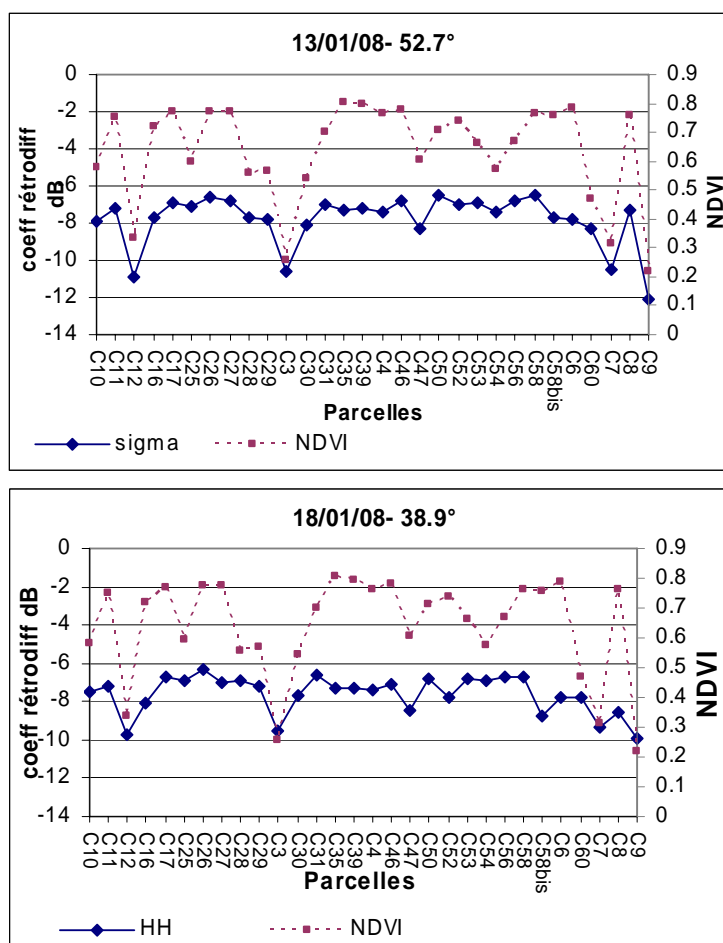


Figure 15: Dynamique du signal RADAR selon l'angle d'incidence.

Cette observation est d'autant plus nette sur les images acquises avec le capteur ASAR/ENVISAT. La figure 16 illustre le cas de l'image acquise le 18/10/07 avec un angle d'incidence de 33° à partir de laquelle on constate que les valeurs élevées du coefficient de rétrodiffusion correspondent à des parcelles dont l'état végétatif est peu avancé (faibles valeurs de NDVI).

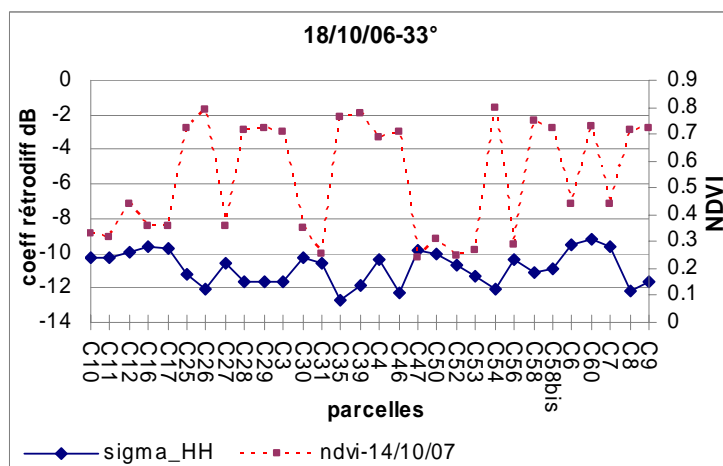


Figure 16 : Coefficient de rétrodiffusion extrait de l'image acquise par le capteur ASAR/ENVISAT, avec un angle d'incidence de 33°.

Nous nous sommes également intéressés au rapport entre deux signaux RADAR acquis à des dates proches mais avec deux angles d'incidence différents. Pour cela, nous avons pu utiliser les images acquises par les capteurs TERRASAR-X et ASAR/ENVISAT, qui présentent plusieurs couples d'images acquises à des dates proches. Les images acquises par le capteur ALOS/PALSAR étant trop espacées dans le temps ne permettent pas ce genre d'application.

Les figures 17 et 18 ci-dessous représentent respectivement le rapport signal RADAR à incidence forte/signal RADAR à incidence faible pour les capteurs TERRASAR-X et ALOS/PALSAR. Les états culturaux sont estimés via les valeurs de NDVI (images SPOT) mis en parallèle. Pour ces deux cas, on observe bien que le résultat permet de discriminer plus finement les différences entre parcelles.

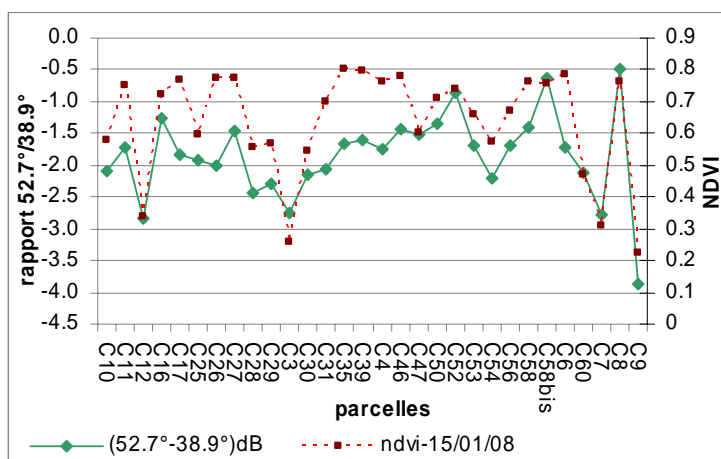


Figure 17 : Rapport du signal RADAR acquis le 13/01/08 avec $\theta=52.7^\circ$ sur le signal RADAR acquis le 18/01/07 avec $\theta=38.9^\circ$, par le capteur TERRASAR-X.

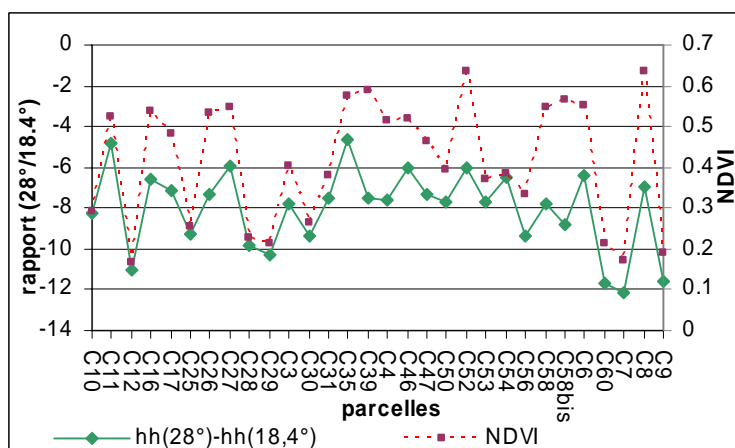


Figure 18 : Rapport du signal RADAR acquis le 06/12/07 avec $\theta=28^\circ$ sur le signal RADAR acquis le 10/12/07 avec $\theta=18^\circ$, par le capteur ASAR/ENVISAT.

Les figures 19 et 20 montrent que le signal RADAR peut être relativement élevé pour les parcelles labourées si la rugosité de surface de celle-ci est importante. En effet, cet état cultural est caractérisé par de NDVI relativement faibles mais avec des valeurs de coefficient de rétrodiffusion élevées. A titre d'exemple, on note les cas des parcelles C12 et C3 pour la date du 05/12/07 (35° , ALOS/PALSAR) (Figure 19), ou encore des parcelles C58bis et C8 pour la date du 19/05/07 (44° , ASAR/ENVISAT) (Figure 20).

Remarque : Le seuil minimal d'angle d'incidence pour lequel le signal RADAR est capable de différencier les états culturaux dépend du type capteur RADAR. On a pu l'observer avec le capteur ALOS/PALSAR : à l'incidence 35° le capteur ALOS/PALSAR différencie encore bien les stades de croissances de la canne (excepté les sols labourés), alors que le capteur ASAR/ENVISAT ne différencie plus les états de parcelles avec un angle d'incidence inférieur à 33° (figure 15). Ainsi, ce seuil limite d'angle d'incidence dépend des caractéristiques du capteur RADAR telles que la longueur d'onde, la résolution spatiale ou encore la polarisation HH ou VV.

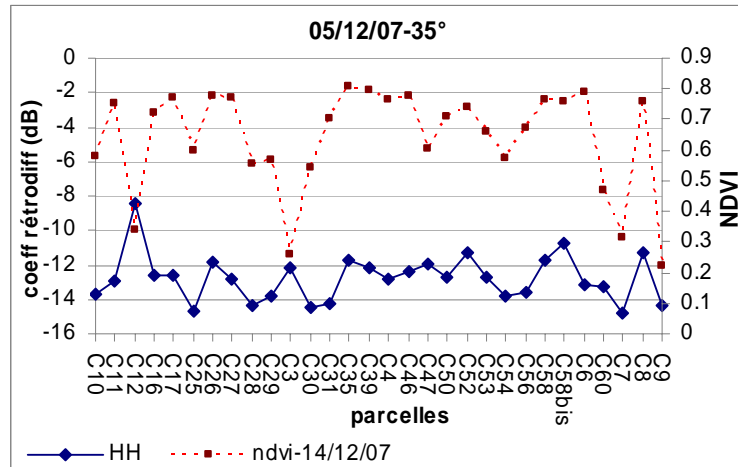


Figure 19 : Cas de parcelles labourées C12 et C3. Image acquise par le capteur ALOS/PALSAR, avec $\theta=35^\circ$ et une polarisation HH.

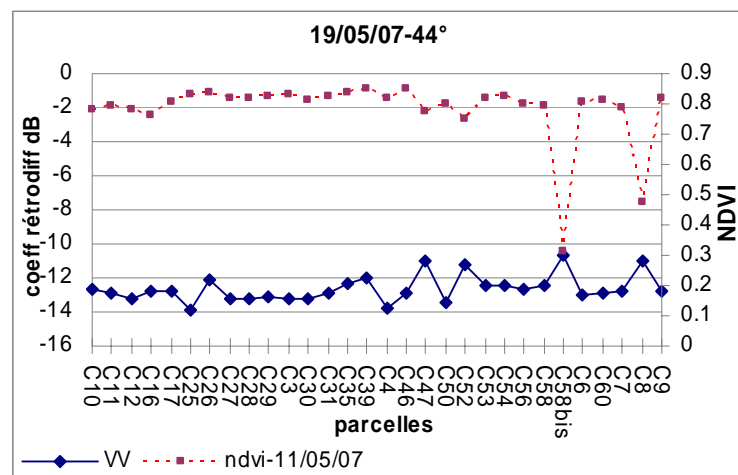


Figure 20 : Cas des parcelles labourées C58bis et C8. Image acquise par le capteur ASAR/PALSAR, avec $\theta=44^\circ$ et une polarisation VV.

II-2 Sensibilité du coefficient de rétrodiffusion à la hauteur de la canne (mesurée sur le terrain)

Ayant à disposition des mesures terrain de hauteur de la canne pour certaines parcelles de référence effectuées les 15 et le 18 janvier 2008, nous avons analysé la relation entre le coefficient de rétrodiffusion acquis pour une date relativement proche des mesures de

terrain et les mesures de hauteur. La figure 21 présente les valeurs du coefficient de rétrodiffusion des différentes parcelles pour différentes valeurs de hauteur de couvert.

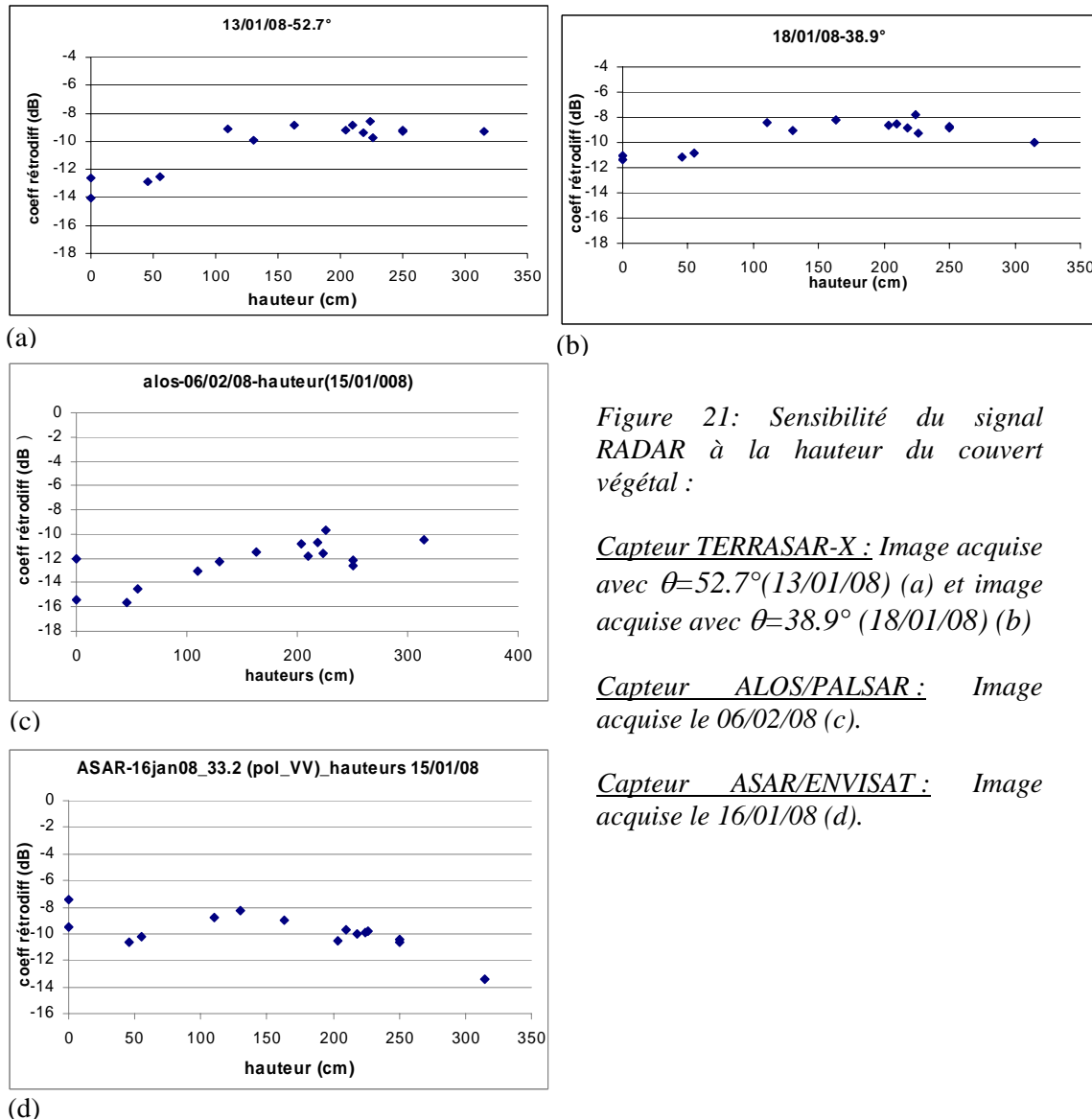


Figure 21: Sensibilité du signal RADAR à la hauteur du couvert végétal :

Capteur TERRASAR-X : Image acquise avec $\theta=52.7^\circ$ (13/01/08) (a) et image acquise avec $\theta=38.9^\circ$ (18/01/08) (b)

Capteur ALOS/PALSAR : Image acquise le 06/02/08 (c).

Capteur ASAR/ENVISAT : Image acquise le 16/01/08 (d).

On observe une sensibilité du signal RADAR à la hauteur de la canne. En effet, pour le capteur TERRASAR-X ainsi que pour celui de ALOS/PALSAR, le coefficient de rétrodiffusion augmente avec la hauteur, et ce jusqu'à une hauteur limite au-delà de laquelle le signal RADAR tend à saturer. D'après les graphiques ci-dessus, on constate qu'à partir d'une hauteur de canne d'environ 125cm les valeurs de coefficient de rétrodiffusion stagnent entre -12 et -10 dB pour les capteurs TERRASAR-X et ALOS/PALSAR.

Pour le capteur ASAR/ENVISAT, on note également une sensibilité du signal RADAR jusqu'à une hauteur limite de 100-125cm. Cependant au-delà de cette valeur, le coefficient de rétrodiffusion diminue avec la hauteur de la canne. Par conséquent, le capteur ASAR/ENVISAT ne permet pas de distinguer les différentes hauteurs de canne. Il semblerait que les cannes mesurant plus de 125cm sont aperçues comme des surfaces de plus en plus lisses au fur et à mesure de leur croissance. Cette confusion peut s'expliquer par la longueur d'onde et la résolution spatiale (30m) du capteur non appropriées.

On note à nouveau l'influence de l'angle d'incidence sur le signal RADAR. Les deux images acquises par le capteur TERRASAR-X (figures 21 a et b), et avec deux angles d'incidences différents montrent une différence de dynamique du signal RADAR. Avec $\theta=52.7^\circ$, la discrimination entre canne de petite taille (50cm) et de taille plus importante (125cm) est plus marquée qu'avec $\theta=38.9^\circ$.

Ce qui confirme l'observation apportée dans le paragraphe précédent sur le plus fort potentiel des signaux acquis avec de fortes incidences pour différencier les états de croissance de la canne à sucre.

Par ailleurs, pour les trois capteurs RADAR (TERRASAR-X, ALOS/PALSAR et ASAR/ENVISAT), les parcelles labourées en début d'année 2008, telles que les C3 et C9, peuvent être confondues avec des parcelles un peu plus avancées dans leur cycle. En effet, ces parcelles labourées (hauteurs de canne nulle sur les figures 20 a, b, c et d) ont des valeurs de coefficient de rétrodiffusion relativement élevées :

- Environ -11dB pour l'image du 18/01/08 (capteur TERRASAR-X), c'est-à-dire du même ordre de valeur que les parcelles recouvertes par de la canne d'une hauteur de 50cm (environ 1mois).

- Environ -12dB pour l'image du 06/02/08 (capteur ALOS/PALSAR). Ainsi la parcelle C9 peut être confondue avec des parcelles recouvertes par de la canne de 100-125cm (environ 4mois).

- Entre -10 et -7dB pour l'image du 16/01/08 (capteur ASAR/ENVISAT). Les parcelles labourées sont confondues alors avec les cannes de hauteurs de 125cm (environ 4mois).

Le signal RADAR est donc très sensible à la rugosité des parcelles labourées. Toutefois, il semble que le capteur RADAR TERRASAR-X entraîne une confusion moins importante qu'avec les deux autres capteurs RADAR. Cette meilleure différenciation peut être expliquée par la résolution spatiale métrique ainsi qu'à la petite longueur d'onde ($\sim 3\text{cm}$) du capteur TERRASAR-X.

II-3 Relation entre coefficient de rétrodiffusion et indice de végétation NDVI

L'état végétatif des cultures de canne à sucre est estimé via les valeurs de l'indice de végétation NDVI. Précédemment, il nous a permis d'avoir une approche qualitative sur l'état végétatif des parcelles pour différentes dates afin de voir si la dynamique du signal RADAR observée pour les différents états culturaux était corrélée avec celle des valeurs de NDVI. Il est donc intéressant d'analyser plus en détail la relation entre le coefficient de rétrodiffusion et le NDVI.

Le NDVI sature à partir d'un certain stade de croissance ; c'est-à-dire pour des cannes mesurant plus de 100-150cm, ce qui correspond à des cannes âgées de 3-4 mois. De ce fait, on va s'intéresser aux dates d'acquisition des images RADAR pour lesquelles une grande partie des parcelles n'a pas encore atteint ce stade de développement. Et ce, plus particulièrement pour les capteurs TERRASAR-X et ALOS/PALSAR, car le potentiel discriminant est plus fort pour ces deux capteurs.

La figure 22 montre la relation entre l'indice de végétation NDVI et le coefficient de rétrodiffusion pour les images du 13/01/08 et du 18/01/08 acquises par le capteur TERRASAR-X. On remarque une plus forte corrélation pour les coefficients de rétrodiffusion extraits de l'image acquise avec un angle d'incidence fort ($\theta = 52.7^\circ$). Le R^2 est de 0.79 contre

0.48 pour $\theta=38.9^\circ$. Cela confirme les observations faites précédemment sur le rôle de l'incidence sur le signal RADAR.

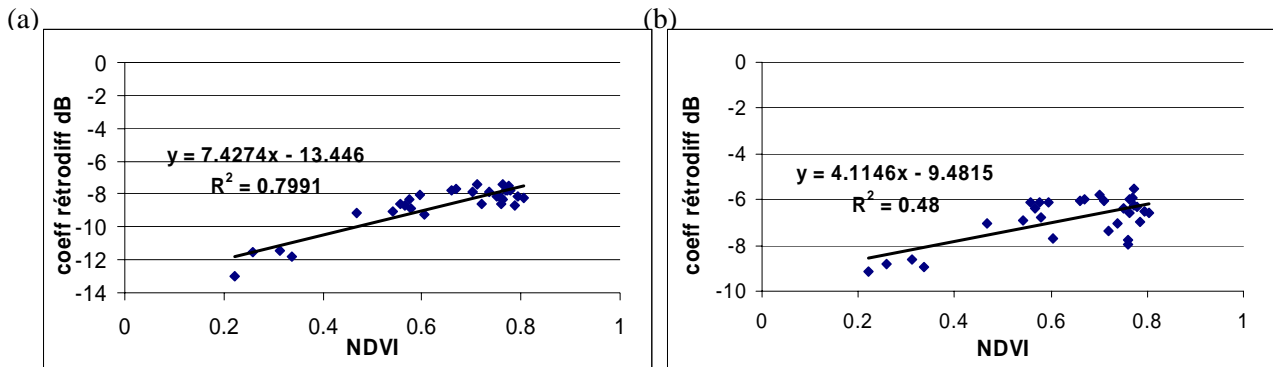


Figure 22 : Relation entre le coefficient de rétrodiffusion et le NDVI. Cas de l'image acquise avec $\theta=52.7^\circ$ (a) et de l'image acquise avec $\theta=38.9^\circ$ (b), par le capteur TERRASAR-X.

Pour le capteur ALOS/PALSAR, nous avons analysé les images acquises avec des angles d'incidence forts. Les relations $\sigma_{dB}^0(\text{NDVI})$ ont été étudiées pour les dates du 05/10/06 ($\theta=44.1^\circ$), du 22/10/06 ($\theta=47^\circ$) et du 20/02/07 ($\theta=44.1^\circ$). On note également une corrélation significative (de l'ordre de 0.6 à 0.7) entre ces deux paramètres.

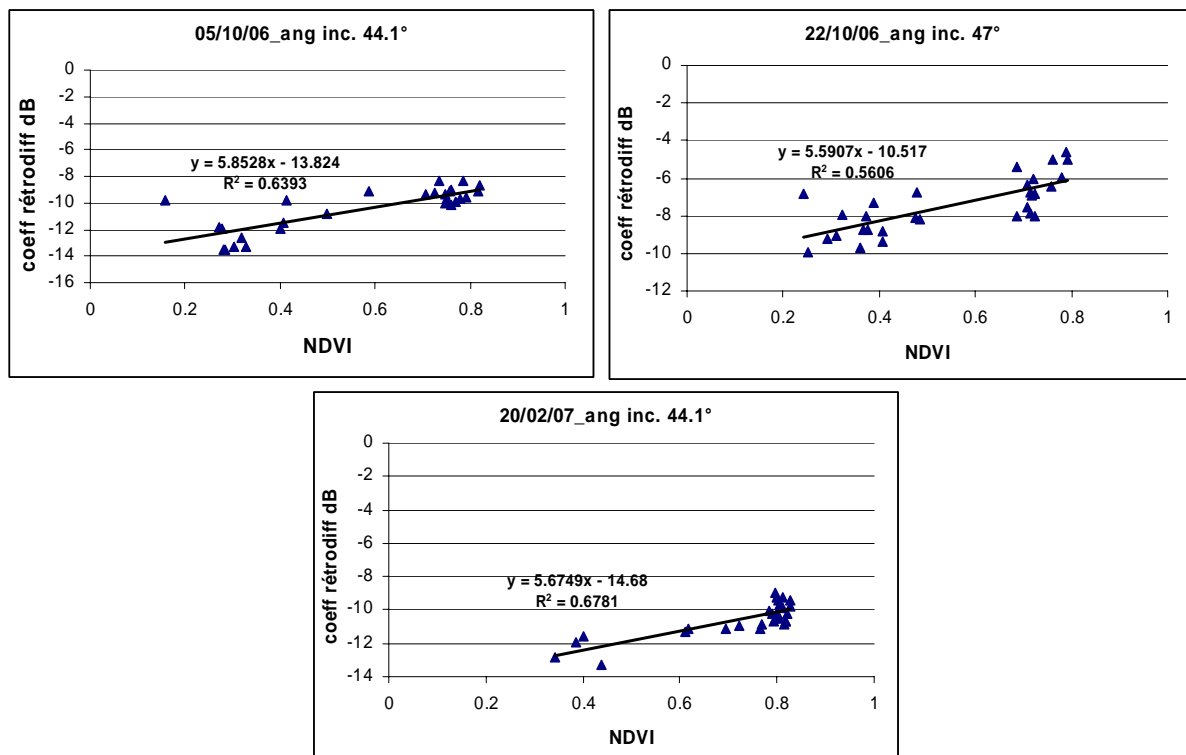


Figure 23 : Relation entre le coefficient de rétrodiffusion et le NDVI. Cas des images acquises le 05/10/06 ($\theta=44.1^\circ$), le 22/10/06 ($\theta=47^\circ$) et le 20/02/07 ($\theta=44.1^\circ$), par le capteur ALOS/PALSAR.

II-4 Relation entre le coefficient de rétrodiffusion et la teneur en eau dans la canne

Comme nous avons pu le voir dans le paragraphe I-3-2, les valeurs de teneur en eau ont été simulées grâce au modèle MOSICAS. Tout comme avec l'indice de végétation, la

teneur en eau dans la canne évolue selon le stade de développement de la canne. Le jus dans les fibres de la canne est maximal (90%) durant les trois à quatre premiers mois, puis il commence à diminuer progressivement. Cela permet la concentration du sucre dans les tiges, et ce, jusqu'à une teneur en eau minimale atteinte en fin de maturation. Ainsi, les dates pour lesquelles nous avons analysé la relation entre σ_{dB}^0 et la teneur en eau (%eau) sont celles situées pendant la période de maturation pour la majeure partie des parcelles de référence, c'est-à-dire entre les mois de juillet et mi septembre de l'année 2007. Les dates d'acquisition concernées sont celles du 06/08/07, du 04/09/07 et du 21/09/07 du capteur ALOS/PALSAR. Par ailleurs, nous avons choisi des parcelles présentant un stade de maturité avancé pour ces trois dates. Les parcelles C52, C58bis et C8, qui ont été plantées respectivement le 27/09/06, 01/12/06 et 16/11/06 et n'ont pas été coupées en 2007 correspondent au critère de développement recherché. Ainsi, aux dates correspondant à la période de maturation de ces deux parcelles, la hauteur de canne est supérieure à 3m (d'après la cinétique de croissance établie précédemment (paragraphe I-3-3)).

La figure 24 illustre la relation entre la teneur en eau (%eau) et le coefficient de rétrodiffusion (σ_{dB}^0) pour les parcelles C52, C58bis et C8, aux dates du 06/08/07, 04/09/07 et du 21/09/07 qui recouvrent la période de maturation de ces parcelles. On constate en effet ici que plus la teneur en eau est importante plus le coefficient de rétrodiffusion est élevé. La corrélation entre ces deux paramètres est de l'ordre de $R^2 \sim 0.7$ durant la phase de maturation.

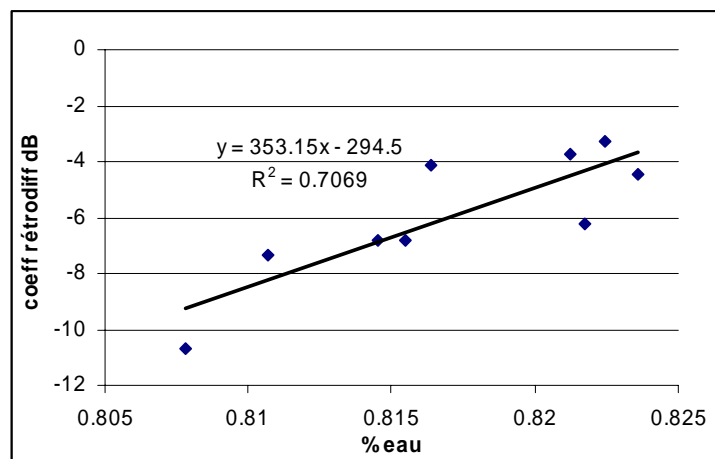


Figure 24 : Relation entre le coefficient de rétrodiffusion et la teneur en eau (%eau). Valeurs extraites aux dates d'acquisition du 06/08/07, 04/09/07 et 21/09/07 pour les parcelles C52, C58bis et C8.

II-5 Suivi temporel coefficient de rétrodiffusion

Cette analyse a été réalisée avec les images acquises par le capteur ALOS/PALSAR, car le pas de temps entre chaque date d'acquisition est assez régulier (environ 1mois). Comme nous avons pu le constater dans la partie I-3-4, une étape de normalisation angulaire des données a dû être réalisée afin de pouvoir étudier dans la continuité les coefficients de rétrodiffusion extraits des différentes images (indépendamment de l'incidence RADAR). Ainsi pour chaque parcelle de référence on peut observer l'évolution du signal RADAR et analyser sa sensibilité aux événements culturels tels que la pousse de la canne, la récolte ou encore le labour. Pour cela, les dates de coupes, ainsi que l'interprétation visuelle des images SPOT et le suivi temporel du NDVI pour chaque parcelle ont été analysés en parallèle avec l'évolution du coefficient de rétrodiffusion au cours du temps. Les résultats ont montré plusieurs points intéressants :

-Tout d'abord, pour l'ensemble des parcelles de référence, on a constaté que le coefficient de rétrodiffusion augmente progressivement durant la phase de croissance de la canne à sucre. L'exemple de la parcelle C10 (figure 25) illustre cette sensibilité du signal RADAR à la croissance de la canne. De plus, on constate également que le signal RADAR est sensible à la coupe de la canne. En effet, la parcelle C10 étant récoltée le 08/11/07 d'après les dates de récoltes données par l'exploitant, on observe bien une baisse du signal après cette date-là.

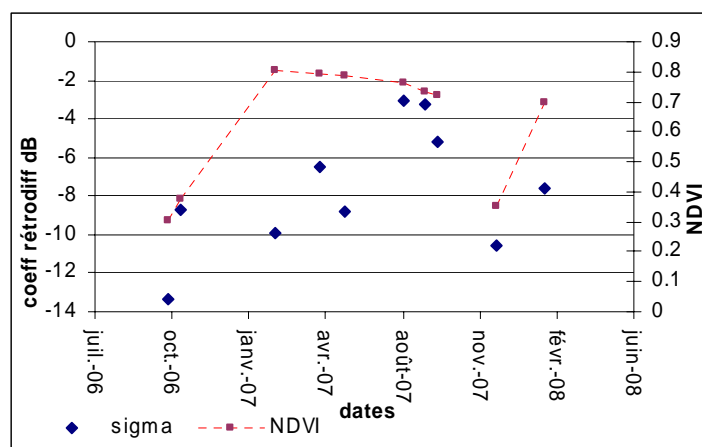


Figure 25 : Suivi temporel du coefficient de rétrodiffusion pour la parcelle c10. En parallèle, suivi temporel du NDVI.

-Par ailleurs, nous avons pu identifier des cas de stress hydrique. C'est-à-dire un dessèchement de la canne provoqué par un apport en eau insuffisant par rapport aux besoins nécessaires au bon développement de la canne. En effet, lorsque la canne à sucre ne trouve pas dans son environnement des quantités suffisantes d'eau, elle puise dans ses réserves et se dessèche progressivement. Cependant, cet état de stress hydrique de la canne cesse dès que son milieu lui fournit à nouveau des quantités en eau suffisante, par exemple après des fortes précipitations les réserves en eau dans le sol sont reconstituées.

Le fait que nos parcelles de références ne soient pas irriguées, et que la pluviométrie ne soit pas abondante pendant la période hivernale (fraîche et sèche), peut amener la canne à sucre à un état de stress hydrique. Ce dernier a été observé au niveau des parcelles C52 et C8, avec une diminution de la teneur en eau suivie d'une augmentation de la teneur en eau. Par ailleurs nous avons vu précédemment, la corrélation significative entre la teneur en eau et le signal RADAR durant la phase de maturation, ce qui explique l'évolution du coefficient de rétrodiffusion très semblable à celle de la teneur en eau. De même, on observe cet état de stress hydrique au niveau de l'état végétatif via l'évolution du NDVI (Figure 26 b). En effet, durant cette même phase de stress hydrique, on constate une diminution du NDVI.

Dans un second temps, on remarque une faible diminution du NDVI en fin de croissance de la canne à sucre, et ce pour la majorité des parcelles de référence. Nous pouvons observer cela, par exemple, pour la parcelle C10 (figure 25). Cette évolution du NDVI est courante et traduit un dessèchement de la canne dans son ensemble (tiges et feuilles), favorisant la concentration de sucre dans les fibres.

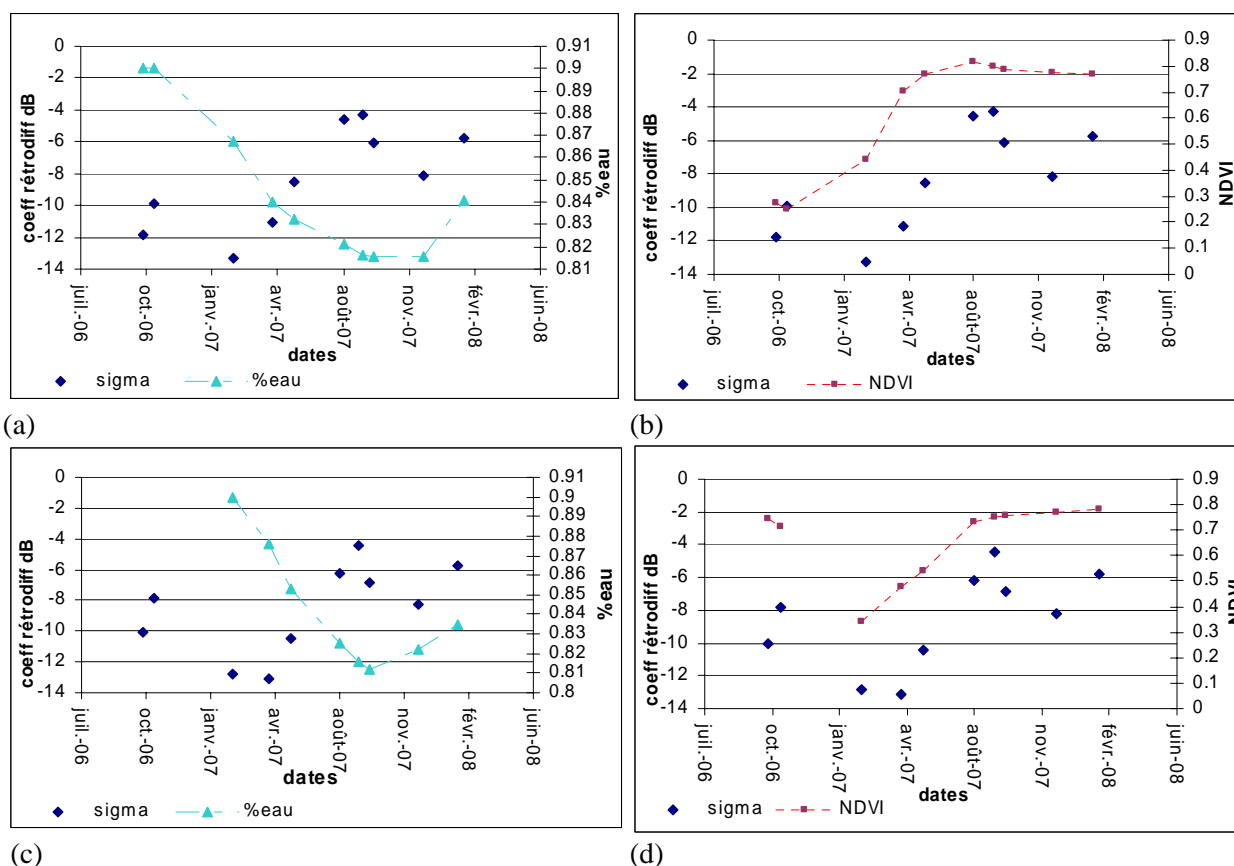


Figure 26 : Stress hydrique, cas de la parcelle c8 : suivis temporels de σ_{dB} et de la teneur en eau (%eau) (a : c52, b : c8). Suivis temporels de σ_{dB} et du NDVI (b : c52, d : c8).

-Il est possible de repérer les périodes de labours des parcelles d'après l'évolution du coefficient de rétrodiffusion et de l'état végétatif via les valeurs de NDVI. Nous pouvons analyser ce cas avec la parcelle C12, qui a été labourée après sa date de coupe de 2007 (23/07/07). Comme nous pouvons l'observer sur la figure 26, la croissance de la canne via les valeurs croissantes de NDVI, est progressive jusqu'à la date de récolte après laquelle les valeurs de NDVI sont faibles (0.27). Parallèlement à cet indice de végétation, on constate également une augmentation du coefficient de rétrodiffusion pendant la période de pousse de la canne et des valeurs élevées de ce dernier (entre -8 et -6dB) après la date de coupe (23/07/07). On retrouve ainsi les caractéristiques propres à l'état de labour déjà évoquées dans l'analyse synchronique du signal RADAR, c'est à dire coefficient de rétrodiffusion élevé et NDVI faible. Ainsi, la confusion des sols labourés avec des états de croissance plus avancés est à nouveau mise en avant.

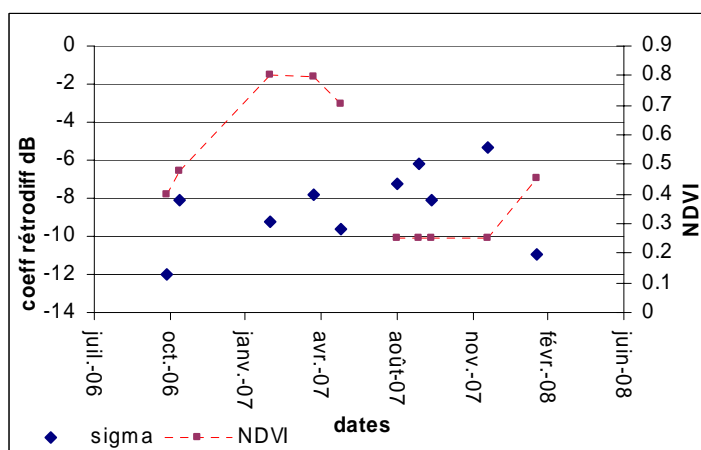


Figure 27 : Mise en évidence du cas de labour, avec la parcelle c12, après sa date de récolte (23/07/07). En parallèle, suivi temporel du NDVI (trait discontinu).

Synthèse et conclusion

D'après l'ensemble des analyses réalisées sur le potentiel des trois capteurs RADAR (TERRASAR-X, ALOS/PALSAR et ASAR/ENVISAT) pour la caractérisation des différents états culturaux des parcelles de canne à sucre (canne coupée, sol labouré, canne avec différents stade de croissance), nous avons mis en évidence plusieurs points sur la sensibilité respective des trois capteurs à la taille de la canne.

Tout d'abord, l'angle d'incidence influence significativement le potentiel de différenciation d'un capteur RADAR. Bien que d'autres facteurs interviennent tels que la résolution spatiale ou encore la longueur d'onde, nous avons pu observer pour les trois capteurs RADAR que plus l'angle d'incidence est fort plus la dynamique du signal RADAR était importante. De même le rapport d'un signal RADAR acquis avec un fort angle d'incidence sur un signal acquis avec une faible incidence permet, et ce à deux dates proches, de différencier plus finement les stades de croissances de la canne.

Concernant le paramètre polarisation, nous avons pu constater, que le type de polarisation croisée est légèrement plus sensible à la hauteur de la canne, que le type de polarisation parallèle.

Ainsi dans un premier temps, nous observons que les capteurs RADAR permettent de différencier les différents stades de développement de la canne, et ce notamment lors du suivi temporel du coefficient de rétrodiffusion. Ce dernier augmente avec la hauteur de la canne.

Toutefois, deux problèmes majeurs limitent le potentiel de différenciation des images RADAR : les parcelles labourées et les états de stress hydrique. En effet, les sols labourés présentent une certaine rugosité de surface. Ainsi, selon la longueur d'onde du capteur, la confusion de ce type de sol peut se faire avec des hauteurs de canne à sucre plus ou moins importantes. Parmi les trois capteurs RADAR c'est celui de TERRASAR-X qui permet de mieux caractériser les différents états culturaux de parcelles. Une autre limite des images RADAR est rencontrée au niveau de la teneur en eau de la canne. Le signal RADAR étant très sensible à cette variable, l'interprétation des valeurs de coefficient de rétrodiffusion est plus délicate. Nous avons abordé ce point avec des cas de stress hydrique lors du suivi temporel du signal RADAR, mais cela est aussi à regarder lors des jours de fortes précipitations.

Les données RADAR présentent alors une source d'information complémentaire de celle apportée par les images optique. Car elles permettent de donner plus de précision sur la hauteur de la canne (capteurs TERRASAR-X et ALOS/PALSAR). Aussi, elles permettent de suivre le cycle cultural pour une parcelle de canne à sucre. Toutefois, l'état des parcelles labourées demeure une limite à laquelle pour l'instant seul un capteur en bande X et de résolution spatiale fine (TERRASAR-X) permet le moins de confusion possible avec de la canne plus développée.

Références bibliographiques

- ALOS products, 2007. Information ALOS PALSAR products for ADEN users. *Reference: ALOS-GSEG-EOPG-TN-07-0001*, Technical Note, ESA.
http://earth.esa.int/download/alos/PALSAR_info_users_v1.1.pdf.
- Baghdadi N, Berner M, 2001. Evaluation of C-band data for wetland mapping. *International Journal of Remote Sensing*, volume 22, issue 1, p71-88
- Bégué. A, 2005. Rapport final SUCRETTE : Compte-rendu de fin de recherche d'opération d'une recherche financée par le ministère de la jeunesse, de l'éducation et de la recherche. CIRAD, p 8.
- BEST W Software, 2005. Basic Envisat SAR Toolbox, Version 4.0.3. European Space Agency (ESA); <http://envisat.esa.int/>
- Choudhury.I; Chakraborty.M, 2006. SAR signature investigation if rice crop using RADARSAT data. *International Journal of Remote Sensing*, volume: 27, issue: 3, p519-354.
- Courteau.A, 2005. Rapport de stage : La canne à sucre et l'environnement à La Réunion: revue bibliographique. CIRAD, p 7-11.
- Fritz T., 2007. TerraSAR-X Ground Segment Level 1b Product Format Specification (10.12.2007), Doc.: TX-GS-DD-3307, Issue, 1.3, p257.
http://www.dlr.de/tsx/documentation/TX-GS-DD-3307_Level-1b-Product-Format-Specification_1.3.pdf
- Girard. M-C, Girard. C, 1999, « Traitement des données de télédétection », Dunod, p23
- Hegarat-Masclé, S-Le, 2000. Land cover discrimination from multitemporal ERS images and multispectral Landsat images: a study case in an agricultural area in France. *International Journal of Remote Sensing*, volume 21, issue: 3, p 435-456.
- Hoarau. T, 2004. Rapport de stage : Contribution au diagnostic des systèmes d'irrigation (en couverture intégrale) chez 6 agriculteurs du périmètre du bras de la plaine. CIRAD, p 63
- Kuplick.T.M; Freinkas.C.C, 2000. The study of ERS 1 SAR and Landsat TM synergism for land use classification. *International Journal of Remote Sensing*, volume 31, issue 10, 2000, p-2101-2111.
- Raunet. M, 1991. Les grandes catégories de sols de l'île de La Réunion_notice de la carte morpho-pédologique à l'échelle du 1/50000. IRAT.
- Schotten C.G; Van Rooy W.W.L, 1995. Assessment of the capacities of multi-temporal ERS-1 SAR data to discriminate between agricultural crops. *International Journal of Remote Sensing*, volume: 16, issue: 14, 1995, p 2619-2637
- Vignais G; Martiné JF, 2004. SIMULEX/MOSICAS Notice d'utilisation. CIRAD-Station de la Bretagne, p36

Figures :

<u>Figure 1</u> : Répartition des champs de canne à sucre sur l'île de La Réunion en vert.....	7
<u>Figure 2</u> : Le cycle annuel et cycle foral.....	7
<u>Figure 3</u> : Décomposition du cycle annuel.....	8
<u>Figure 4</u> : Localisation du site d'étude (exploitation de B.Caruel)(cercle blanc ; image SPOT du 11/12/2006.....	10
<u>Figure 5</u> : Géométrie d'acquisition du signal RADAR. A droite l'angle d'incidence. A gauche, la polarisation : plan dans lequel l'onde est émise : H (Horizontale : dans le plan du champ électrique), V (verticale : perpendiculairement au champ électrique).....	10
<u>Figure 6</u> : Méthodes de calcul et d'extraction de l'indice de végétation NDVI moyen par parcelle.....	17
<u>Figure 7</u> : Parcelles de références ; Image SPOT (20/10/07).....	18
<u>Figure 8</u> : a. Localisation des trois stations météorologiques Bagatelle, La Mare, Grand Hazier autour des parcelles de références (contour rouge) .b : données de précipitations sur trois stations météorologiques.....	19
<u>Figure 9</u> : Schéma du modèle de simulation de croissance MOSICAS.....	19
<u>Figure 10</u> : Hauteur de la canne à sucre en fonction de son âge (nombre de jours après la dernière coupe).....	21
<u>Figure 11</u> : Localisation de la cible choisie (pointillés rouge et noir) pour la normalisation des données (latitude : 21° 1' 58.98 '' Sud ; longitude : 55° 34' 16.40'' Est) ; parcelles de référence à proximité de Ste Suzanne en rouge.....	23
<u>Figure 12</u> : Relation entre le coefficient de rétrodiffusion en décibel de la zone utilisée pour la normalisation de l'incidence RADAR et $10\log_{10}(\cos(\theta))$	24
<u>Figure 13</u> : Coefficient de rétrodiffusion et NDVI pour chaque parcelles de référence, à la date du 13/01/08 pour le capteur TERRASAR-X du 05/10/06 pour ALOS/PALSAR et du 22/04/07 pour ASAR/ENVISAT	25
<u>Figure 14</u> : Sensibilité du signal RADAR selon le type de polarisation. Image acquise le 23/05/07 par le capteur ALOS/PALSAR, avec un angle d'incidence de 44.1°, polarisation parallèle (HH), polarisation croisée (HV).....	26
<u>Figure 15</u> : Figure 14: Dynamique du signal RADAR selon l'angle d'incidence	27
<u>Figure 16</u> : Coefficient de rétrodiffusion extrait de l'image acquise par le capteur ASAR/ENVISAT, avec un angle d'incidence de 33°.....	27

<u>Figure 17</u> : Rapport du signal RADAR acquis le 13/01/08 avec $\theta=52.7^\circ$ sur le signal RADAR acquis le 18/01/07 avec $\theta=38.9^\circ$, par le capteur TERRASAR-X.....	28
<u>Figure 18</u> : Rapport du signal RADAR acquis le 06/12/07 avec $\theta=28^\circ$ sur le signal RADAR acquis le 10/12/07 avec $\theta=18^\circ$, par le capteur ASAR/ENVISAT.....	28
<u>Figure 19</u> : Cas de parcelles labourées C12 et C3. Image acquise par le capteur ALOS/PALSAR, avec $\theta=35^\circ$ et une polarisation HH.....	29
<u>Figure 20</u> : Cas des parcelles labourées C58bis et C8. Image acquise par le capteur ASAR/PALSAR, avec $\theta=44^\circ$ et une polarisation VV.....	29
<u>Figure 21</u> : Sensibilité du signal RADAR à la hauteur du couvert végétal : Capteur TERRASAR-X : Image acquise avec $\theta=52.7^\circ$ (13/01/08) (a) et image acquise avec $\theta=38.9^\circ$ (18/01/08) (b) ; Capteur ALOS/PALSAR : Image acquise le 06/02/08 (c) ; Capteur ASAR/ENVISAT : Image acquise le 16/01/08 (d).....	30
<u>Figure 22</u> : Relation entre le coefficient de rétrodiffusion et le NDVI. Cas de l'image acquise avec $\theta=52.7^\circ$ (a) et de l'image acquise avec $\theta=38.9^\circ$ (b), par le capteur TERRASAR-X.....	32
<u>Figure 23</u> : Relation entre le coefficient de rétrodiffusion et le NDVI. Cas des images acquises le 05/10/06 ($\theta =44.1^\circ$), le 22/10/06 ($\theta =47^\circ$) et le 20/10/07 ($\theta =44.1^\circ$), par le capteur ALOS/PALSAR.....	32
<u>Figure 24</u> : Relation entre le coefficient de rétrodiffusion et la teneur en eau (%eau). Valeurs extraites aux dates d'acquisition du 06/08/07, 04/09/07 et 21/09/07 pour les parcelles C52, C58bis et C8.....	32
<u>Figure 25</u> Figure 24 : Suivi temporel du coefficient de rétrodiffusion pour la parcelle c10. En parallèle, suivi temporel du NDVI.....	34
<u>Figure 26</u> : Stress hydrique, cas de la parcelle c8 : suivis temporels de σ_{dB}° et de la teneur en eau (%eau) (a : c52, b : c8). Suivis temporels de σ_{dB}° et du NDVI (b : c52, d : c8).....	35
<u>Figure 27</u> : Mise en évidence du cas de labour, avec la parcelle c12, après sa date de récolte (23/07/07). En parallèle, suivi temporel du NDVI (trait discontinu).....	35

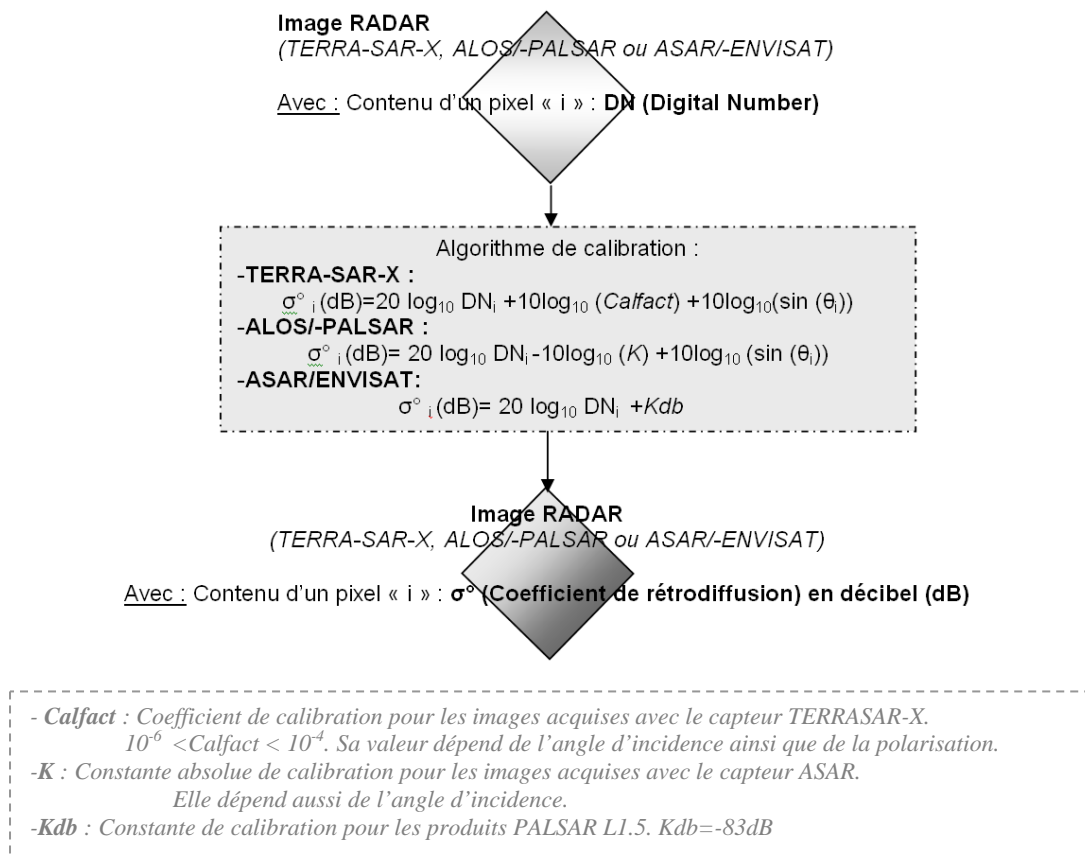
Tableaux :

<u>Tableau 1</u> : Caractéristiques générales des capteurs RADAR étudiés dans cette étude.....	12
<u>Tableau 2</u> :(a) Caractéristiques des données SPOT 4 et 5. (b) Dates d'acquisition des images SPOT.....	15
<u>Tableau 3</u> : Angles d'incidence calculés au niveau de la cible choisi pour la normalisation des images ALOS/PALSAR.....	23

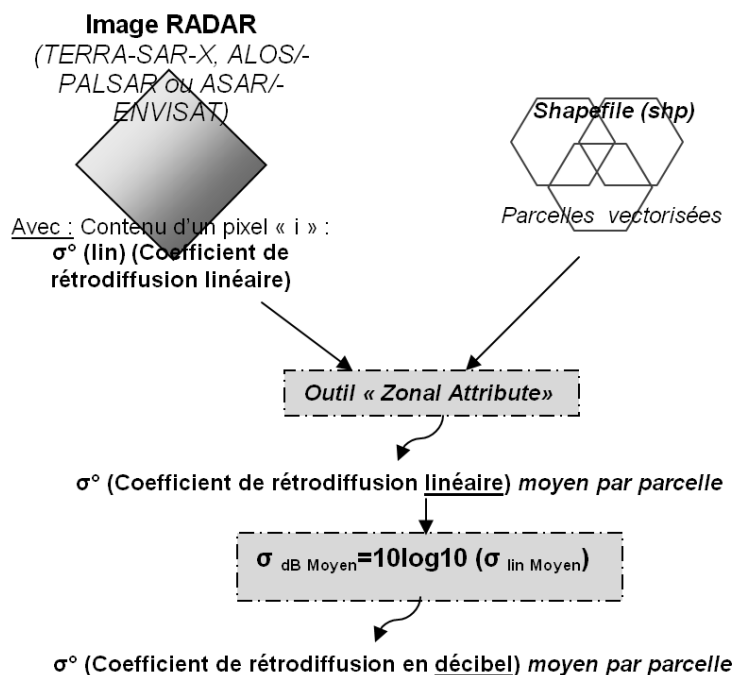
ANNEXES :

<i>Annexe 1 : Algorithme sur ERDAS/Imagine : calibration radio métrique.....</i>	<i>41</i>
<i>Annexe 2 : Algorithme sur ERDAS/Imagine : Extraction du coefficient de rétro diffusion moyen par parcelle de référence.....</i>	<i>41</i>
<i>Annexe 3 : Relevés terrain effectués en janvier 2008 par Aurore Bury.....</i>	<i>42</i>
<i>Annexe 4 : Date de coupe parcelles exploitation B.Caruel.....</i>	<i>43</i>
<i>Annexe 5 : Principe de calcul des angles d'incidence au niveau de la cible pour chaque image ALOS.....</i>	<i>44</i>

Annexe 1 : algorithme sur ERDAS/Imagine : calibration radio métrique



Annexe 2 : algorithme sur ERDAS/Imagine : Extraction du coefficient de rétro diffusion moyen par parcelle de référence



Annexe 3 : Relevés terrain effectués en janvier 2008 par Aurore Bury

15/01/2008							
parcelles	pente	heure	états culture	rugosité sol	hauteur	humidité	remarques
3	terrain plat	9h15	en cours de labours	rugueuse	0cm	sec	-
4	plat	9h05	repousse+âge (R579)	non	218cm	sec, craquelé	partie basse brûlée
6	plat	8h53	repousse+âge (R579)	non	226cm	sec sec & humide /endroit	culture en bordure maj.
7	moy.	8h40	plantation+âge (R579)	lisse & moy.rugueux/endroit	55cm		plantation récente. Non homogène pousse hétérogène, trous dans sol
8	moy.	7h30	canne vierge (R579)	lisse (sol tassé)	315cm	sec & humide /endroit	couleur paille à la base canne
9	plat	-	labour en prépar.(disque)	moy.rugueuse	0cm	sec & humide /endroit	terre broyée, retournée (Zone homogène)
10	plat	8h20	repousse+âge (R579)	non (tassé)	130cm	sec & humide /endroit	résidus culture entre rangs bien visible
11	plat&moy/endroit	-	repousse+âge (R579)	non	203cm	sec & humide /endroit	résidus culture bien présent, désherbage
12	moy.	8h30	plantation (1mois)	rugueuse (sillons)	45cm	sec	pousse hétérogène, avec herbe par endroit
17	plat	9h40	repousse+âge (R579)	non	162cm	sec	résidus culture couvrent 50%
25	-	-	Repousse (R579)	non	110cm	-	-
26	-	-	Repousse (R579)	non	224cm	-	-
27	-	-	repousse	non	209cm	-	-
35	moy.	9h25	repousse+âge (R579)	non	250cm	humide	Résidus culture 100%, prés. Herbe
39	moy.	9h30	repousse+âge (R579)	non	250cm	humide	Résidus culture 100%, prés. Herbe

18/01/2008							
parcelles	pente	heure	états culture	rugosité sol	hauteur	humidité	remarques
3	terrain plat	8h10	en cours de travail	moy.rugueuse	0	humide	maj. partie du terrain retournée
4	plat	8h05	repousse+âge	non	223cm	sec & humide /endroit	coupe faite av maturité
6	plat	8h00	repousse+âge	non	226cm	sec & humide /endroit	désherbage récent Canne écrasée par endroit
7	moy.	7h50	plantation+âge	Lisse & moy.rug/endr	55cm	sec & humide /endroit	mauvaise herbe, partie basse, entre rangs
8	moy.	7h00	canne vierge	lisse	325cm	terre humide mais ne colle pas	-
9	plat	7h10	labour (disque)	moy.rug (ptes mottes)	0	humide ap passage disque	non homogène
10	plat	7h20	repousse+âge	non	130cm	zone paillis (P.haute) humide	-
11	plat&moy/endroit	7h30	repousse+âge	non	203cm	sec & humide /endroit	-
12	moy.	7h25	plantation (1mois)	rugueuse	51cm	sec & humide /endroit	pousse hétérogène, avec herbe homogène par endroit
17	plat	8h40	repousse+âge (R579)	non	163cm	sec & humide /endroit	-
25	-	-	Repousse (R579)	non	110cm	sec & humide /endroit	résidus culture sur toute surf, pousse hétérogène, trous dans sol

Annexe 3 : Relevés terrain effectués en janvier 2008 par Aurore Bury (suite)

18/01/2008							
parcelles	pente	heure	états culture	rugosité sol	hauteur	humidité	remarques
26	-	-	Repousse (R579)	non	224cm	sec & humide /endroit	beaucoup résidus culture, canne (jaune au tiers) cassée, trous dans sol
27	-	8h55	repousse	non	209cm	sec & humide /endroit	canne jaune au tiers, désherbage, trous dans sol, résidus culture 100%
35	moy.	8h30	repousse+âge (R579)	non	250cm	humide	désherbage fait, trace sillon, haut feuille cassé
39	moy.	8h30	repousse+âge (R579)	non	240-250cm	humide	désherbage fait, trace sillon, haut feuille cassé, hauteur de canne variable

Annexe 4 : Date de coupe parcelles exploitation B.Caruel

Parcelles	2005	2006	2007	date repousse
C10	30/07/05	03/08/06	08/11/07	08/11/07
C11	29/07/05	18/08/06	25/07/07	25/07/07
C12	29/07/05	28/07/06	23/07/07	17/12/07
C16	18/10/05	15/09/06	06/08/07	06/08/07
C17	23/11/04	11/10/06	16/10/07	16/10/07
C25	24/09/05	26/10/06	13/11/07	13/11/07
C26	05/09/05	non	11/09/07	11/09/07
C27	31/08/04	15/09/06	24/08/07	24/08/07
C28	21/10/05	15/11/06	23/11/07	23/11/07
C29	20/10/05	11/11/06	22/11/07	22/11/07
C3	08/11/05	17/11/06	26/10/07	26/10/07
C30	08/09/05	24/10/06	12/11/07	12/11/07
C31	23/08/05	09/10/06	11/10/07	11/10/07
C35	05/09/05	non	24/09/07	24/09/07
C39	21/09/05	non	non	12/10/07
C4	29/10/05	27/10/06	01/09/07	04/09/07
C46	17/08/04	28/11/06	09/10/07	09/10/07
C47	21/11/05	02/08/06	14/12/07	14/12/07
C50	23/07/05	12/09/06	06/10/07	06/10/07
C52	18/11/05	27/09/06	non	27/09/07
C53	22/11/04	26/09/06	02/10/07	02/10/07
C54	22/07/05	05/12/06	29/10/07	29/10/07
C56	06/09/05	12/10/06	30/10/07	30/10/07
C58	19/11/05	non	28/08/07	28/08/07
C58bis	19/11/05	01/12/06	non	01/12/06
C6	12/10/05	19/07/06	03/10/07	03/10/07
C60	05/11/05	19/10/06	20/11/07	20/11/07
C7	06/08/05	14/07/06	10/09/07	13/12/07
C8	04/11/05	16/11/06	27/11/07	16/11/06
C9	10/10/05	27/11/06	27/11/07	09/02/08

Annexe 5 : Principe de calcul des angles d'incidence au niveau de la cible pour chaque image ALOS

Pour chaque images acquises par le capteur RADAR ALOS/PALSAR, le calcul de l'angle d'incidence au niveau de la cible « forêt » a été calculé de la manière suivante :

-à partir de l'image RADAR brute, il existe une relation linéaire entre l'angle d'incidence et le «numéro pixel » (N) dans l'image telle que :

$$\Theta_{\text{cible}} = \alpha N_{\text{cible}} + \Theta_{\text{pixel1}}$$

Avec :

$$\alpha = (\Theta_{\text{pixel central}} - \Theta_{\text{pixel1}}) / (N_{\text{Pixel central}} - N_{\text{Pixel1}})$$

Exemple : image du 06/02/08 ci-contre

$$\Theta_{\text{pixel1}} = 34^\circ ; \Theta_{\text{Pixel central}} = 38.7^\circ$$

$$\begin{aligned} N_{\text{Pixel central}} &= N_{\text{Pixel fin}} / 2 \\ &= 10844 / 2 \\ &= 5422 \end{aligned}$$

$$N_{\text{Pixel 1}} = 0$$

$$\text{Et } \Theta_{\text{cible}} = 0.0009 N_{\text{cible}} + 34$$

